

# **CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS ROCHOSOS**

## **ORGANIZAÇÃO**

FABRICIA BENDA DE OLIVEIRA  
RODSOM DE ABREU MARQUES  
CALVIN DA SILVA CANDOTTI  
EDUARDO BAUDSON DUARTE



**Organizadores**  
**Fabricia Benda de Oliveira**  
**Rodson de Abreu Marques**  
**Calvin da Silva Candotti**  
**Eduardo Baudson Duarte**

**Caracterização de materiais rochosos**  
**Volume 1**

**ALEGRE - ES**  
**CAUFES**  
**2018**





CCENS-UFES Centro de Exatas Naturais e da Saúde, Universidade Federal do Espírito Santo, Alto Universitário, s/n, Caixa Postal: 16, Guararema, Alegre-ES  
Telefax: (28) 3552-8687  
www.alegre.ufes.br

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Sul da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

C257 Caracterização de materiais rochosos [recurso eletrônico] /  
organizadores, Fabricia Benda de Oliveira ... [et al]. - Dados  
eletrônicos. Alegre, ES : CAUFES, 2018.  
120 : il.

Inclui bibliografia.

ISBN: 978-85-54343-01-9

Modo de acesso: <<http://www.geologia.ufes.br/e-book>>

1. Geociências. 2. Pesquisa mineral. I. Oliveira, Fabricia  
Benda de, 1978 - .

CDU: 55

---

Elaborado por Claudia Regina da Rocha Oliveira – CRB-6 ES-576/O

Os textos apresentados nesse livro são de inteira responsabilidade dos autores. Os organizadores não se responsabilizam pela revisão ortográfica e gramatical dos trabalhos apresentados.

**REITOR – UFES**  
**REINALDO CENTODUCATTE**

**DIRETOR DO CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E DA SAÚDE – UFES**  
**NEUZA MARIA BRUNORO COSTA**

**ORGANIZADORES DESTA OBRA**  
**FABRICIA BENDA DE OLIVEIRA**  
**RODSON DE ABREU MARQUES**  
**CALVIN DA SILVA CANDOTTI**  
**EDUARDO BAUDSON DUARTE**

## **APRESENTAÇÃO**

A produção deste trabalho é independente e surgiu da idéia e colaboração de professores, alunos e ex-alunos do curso de Geologia do Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, da Universidade Federal do Espírito Santo.

Estão contidos neste livro 8 trabalhos apresentados na forma de capítulos e que abrangem temas associados às características dos materiais rochosos, como aspectos gemológicos, caracterização física e química de rochas ornamentais, além de técnicas analíticas utilizadas.

O material contido nesta obra servirá de auxílio para estudantes, professores e profissionais da área das geociências em seus trabalhos e pesquisas, além de ser um veículo de divulgação de conhecimento obtido pela UFES desde a criação do curso de Geologia.

## LISTA DE ORGANIZADORES

**Fabricia Benda de Oliveira.** Professora Adjunta do Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, Alegre, ES, e-mail: fabricia.oliveira@ufes.br

**Rodson de Abreu Marques.** Professor Adjunto do Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, Alegre, ES, e-mail: rodson.marques@ufes.br

**Calvin da Silva Candotti.** Geólogo Autônomo, Manaus, AM. calvincandotti@gmail.com

**Eduardo Baudson Duarte.** Geólogo formado pela Universidade Federal do Espírito Santo. Mestrando em Agroquímica, Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, Alegre, ES, e-mail: eduardo\_duarte\_12@hotmail.com

## LISTA DE AUTORES

Adam Barros Fernandes  
Adeildo de Assis Costa Junior  
Bruno Pagung Santi Soares  
Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira  
Carolina Valentim Telles  
Caroline Cibebe Vieira Soares  
Débora Vasconcelos de Oliveira  
Edgar Batista de Medeiros Júnior  
Eduardo Baudson Duarte  
Fabricia Benda de Oliveira  
Gláucia Nascimento Queiroga  
Marco Paulo de Castro  
Marcus Araújo Alves dos Santos  
Mary Ester Santiago Machado  
Meridiana Mendonça de Freitas  
Mirna Aparecida Neves  
Mirna Aparecida Neves  
Raissa Belotti de Mesquita  
Rodson de Abreu Marques  
Rodson de Abreu Marques  
Salomão Silva Calegari  
Simone Pereira Taguchi  
Tamires Costa Velasco  
Tamires Costa Velasco  
Thaís Ruy Aiolfi  
Valerio Raymundo  
Victor Bicalho da Silva

## Sumário

<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>9</b>
<b>Mineralogia e gemologia: causas de cor e aspectos comerciais dos cristais de quartzo de cor natural e obtida por irradiação gama (Cobalto-60) da região de Antônio Dias-MG</b>	
<i>Adam Barros Fernandes, Rodson de Abreu Marques, Fabricia Benda de Oliveira</i>	
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>25</b>
<b>Caracterização petrográfica e geoquímica de mármore situados no Sul do Espírito Santo</b>	
<i>Adeildo de Assis Costa Junior, Edgar Batista de Medeiros Junior, Rodson de Abreu Marques</i>	
<b>Capítulo 3 .....</b>	<b>37</b>
<b>Caracterização mineralógica dos resíduos minerários dispostos no setor capixaba do rio Doce, após o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG</b>	
<i>Eduardo Baudson Duarte, Fabricia Benda de Oliveira, Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira</i>	
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>49</b>
<b>Características físico-químicas e Ensaio SPT (Standard Penetration Test) em um depósito de resíduos de rochas ornamentais</b>	
<i>Marcus Araújo Alves dos Santos, Mirna Aparecida Neves, Simone Pereira Taguchi, Valerio Raymundo</i>	
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>59</b>
<b>Caracterização geoquímica das principais rochas ornamentais beneficiadas no Espírito Santo</b>	
<i>Mary Ester Santiago Machado, Tamires Costa Velasco, Rodson de Abreu Marques, Mirna A. Neves</i>	
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>75</b>
<b>Ocorrência e aspectos mineralógicos da escapolita azul de Italva - RJ</b>	
<i>Meridiana Mendonça de Freitas, Rodson De Abreu Marques, Edgar Batista de Medeiros Júnior, Raissa Belotti de Mesquita, Gláucia Nascimento Queiroga, Marco Paulo de Castro, Débora Vasconcelos de Oliveira, Carolina Valentim Telles, Bruno Pagung Santi Soares, Victor Bicalho da Silva</i>	
<b>Capítulo 7 .....</b>	<b>89</b>
<b>Caracterização petrográfica e micromorfológica de perfil pedogenético em rochas ultramáficas/metaultramáficas na região de Catas Altas-MG</b>	
<i>Tamires Costa Velasco, Edgar Batista de Medeiros Júnior, Caroline Cibebe Vieira Soares, Raissa Beloti de Mesquita, Rodson de Abreu Marques</i>	
<b>Capítulo 8 .....</b>	<b>105</b>
<b>Identificação de materiais de preenchimento de estruturas geológicas por difratometria de raios-x</b>	
<i>Thaís Ruy Aiolfi, Mirna Aparecida Neves, Salomão Silva Calegari, Caroline Cibebe Vieira Soares, Rodson de Abreu Marques</i>	



## Capítulo 1

### **Mineralogia e gemologia: causas de cor e aspectos comerciais dos cristais de quartzo de cor natural e obtida por irradiação gama (Cobalto-60) da região de Antônio Dias-MG**

*Adam Barros Fernandes<sup>1</sup>, Rodson de Abreu Marques<sup>1</sup>, Fabricia Benda de Oliveira<sup>1</sup>*

## **INTRODUÇÃO**

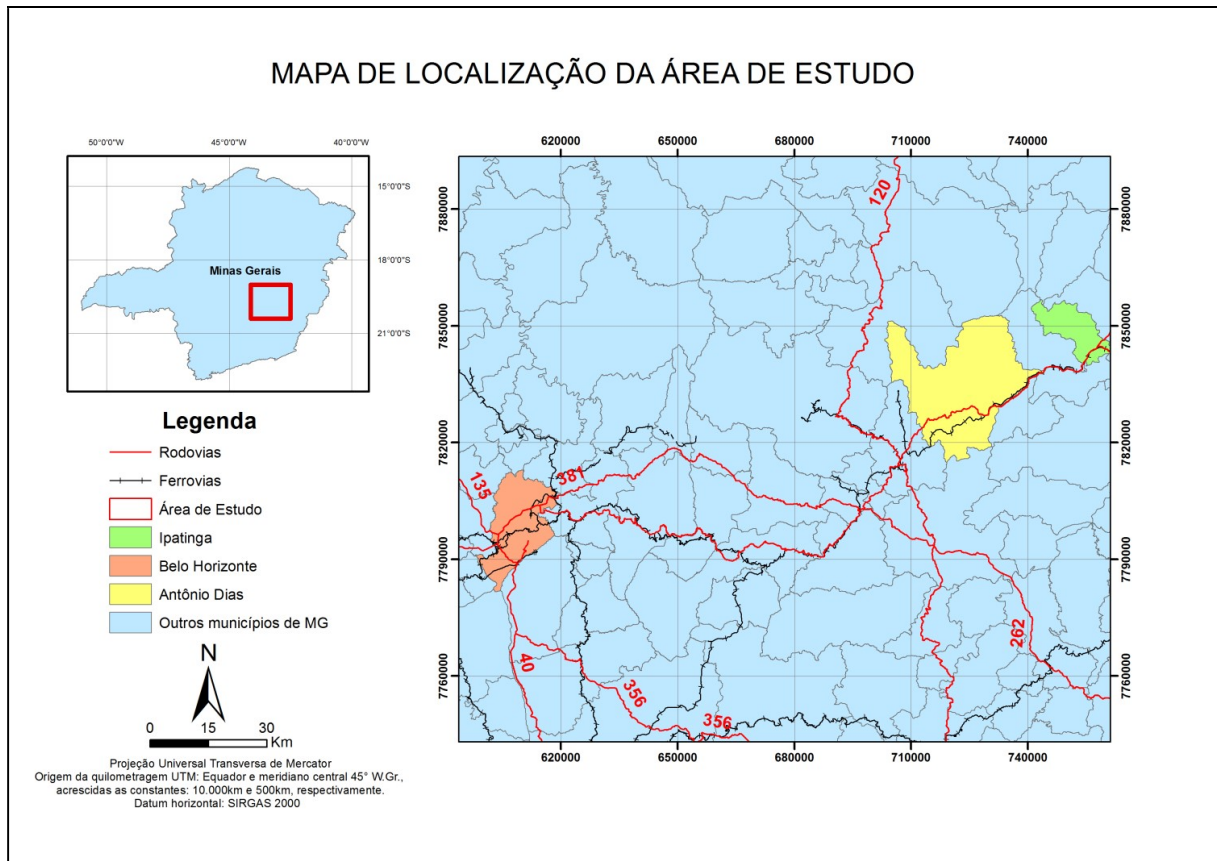
O município de Antônio Dias - MG é detentor de vastas ocorrências minerais com excelente qualidade gemológica, tais como: água marinha, alexandrita, esmeralda, fluorita e topázio (MACHADO, 1998; IWATA, 2000; PADILHA et al., 2000). Por outro lado, os cristais de quartzo são considerados rejeitos na maioria das minerações e garimpos das gemassupracitadas. Segundo Favacho et al (2010), o Brasil encontra-se como um dos principais produtores mundiais de variedades coloridas de quartzo utilizando o método de irradiação gama (Cobalto-60) aplicado em geral no quartzo hialino (incolor) de regiões brasileiras. É importante ressaltar que o estado de Minas Gerais possui uma das maiores reservas de quartzo gemológico do mundo, tanto em quartzos beneficiáveis por irradiação gama e aquecimento quanto em minerais de coleção (FAVACHO; CASTAÑEDA; LICCARDO, 2001). Além disso, segundo Nunes (2008), esses processos de beneficiamento são bem aceitos atualmente pelo mercado de gemas e jóias. Após o beneficiamento, minerais antes de baixo valor comercial podem atingir valor agregado médio em torno de 300% (CRISTINI et al., 2011). Vale ressaltar também que esses processos de beneficiamento são totalmente sustentáveis, pois podem eliminar grandes pilhas de rejeito de quartzo e transformar essa matéria-prima em jóias. Outro fator importante é que esse estudo apresenta caráter pioneiro dentro do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Espírito Santo, pois é o primeiro trabalho sobre beneficiamento de minerais para utilização como gema e também o primeiro sobre esse tema no município de Antônio Dias – MG.

## **LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO**

O município de Antônio Dias – MG está situado na região leste do estado de Minas Gerais a aproximadamente 173 km de Belo Horizonte e 50 km de Ipatinga. A principal via de acesso até o município é a BR-381 (Figura 1).

<sup>1</sup> Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo, CCENS, Alegre, ES

## Mineralogia e gemologia: causas de cor e aspectos comerciais dos cristais de quartzo de cor natural e obtida por irradiação gama (Cobalto-60) da região de Antônio Dias-MG



**Figura 1** - Mapa de localização de Antônio Dias – MG e as principais vias de acesso até o município, na Projeção UTM e no sistema de coordenadas SIRGAS 2000: zona 23 S. Com destaque para a BR-381, que liga Belo Horizonte (vermelho), Antônio Dias (amarelo) e Ipatinga (verde). Fonte: Autores.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA/GEOLOGIA REGIONAL

A área alvo do estudo localiza-se na porção leste do estado de Minas Gerais e está inserida na região de contato da borda sudeste da porção meridional do Cráton São Francisco com a Província Mantiqueira (ALMEIDA, 1977; NEWMAN CARVALHO, 2009). Esse registro geológico é marcado pela existência de litotipos que são datados do Arqueano ao recente, sendo essas unidades pertencentes às Províncias (Estruturais/Geotectônicas) São Francisco e Mantiqueira (ALMEIDA & LITWINSKI, 1984).

O Cráton do São Francisco compõe parte do Escudo Atlântico, localizado na porção centro-leste da Plataforma Sul-Americana. Este segmento crustal foi individualizado como uma unidade geotectônica por Almeida (1977), cujos traçados limítrofes foram redefinidos por Alkmim et al. (1993) e Alkmim (2004). As faixas de dobramento adjacentes ao Cráton do São Francisco representam o registro dos terrenos acrescidos às bordas do referido Cráton através das colisões diacrônicas do ciclo Brasileiro (neoproterozóico-cambriano) e foram designadas da seguinte forma: Araçuaí (Província Mantiqueira, ALMEIDA 1977), Brasília (Província Tocantins, ALMEIDA 1977), Rio Preto (Província Tocantins, INDA et al. 1984), Riacho do Pontal e Sergipana (Província Borborema, BRITO-NEVES 1979).

Segundo Heilbron (2004), a Província Mantiqueira, tal como definida por Almeida (1977, 1981), é paralela à costa atlântica do sudeste e sul do Brasil, delineando uma faixa de direção NE-SW, com mais de 3.000 km de comprimento, que se estende do paralelo 15°S até o Uruguai. Faz limite com as províncias Tocantins, São Francisco e Paraná, e é bordejada, a leste, pela margem continental e pelas bacias costeiras do Espírito Santo, Campos, Santos e



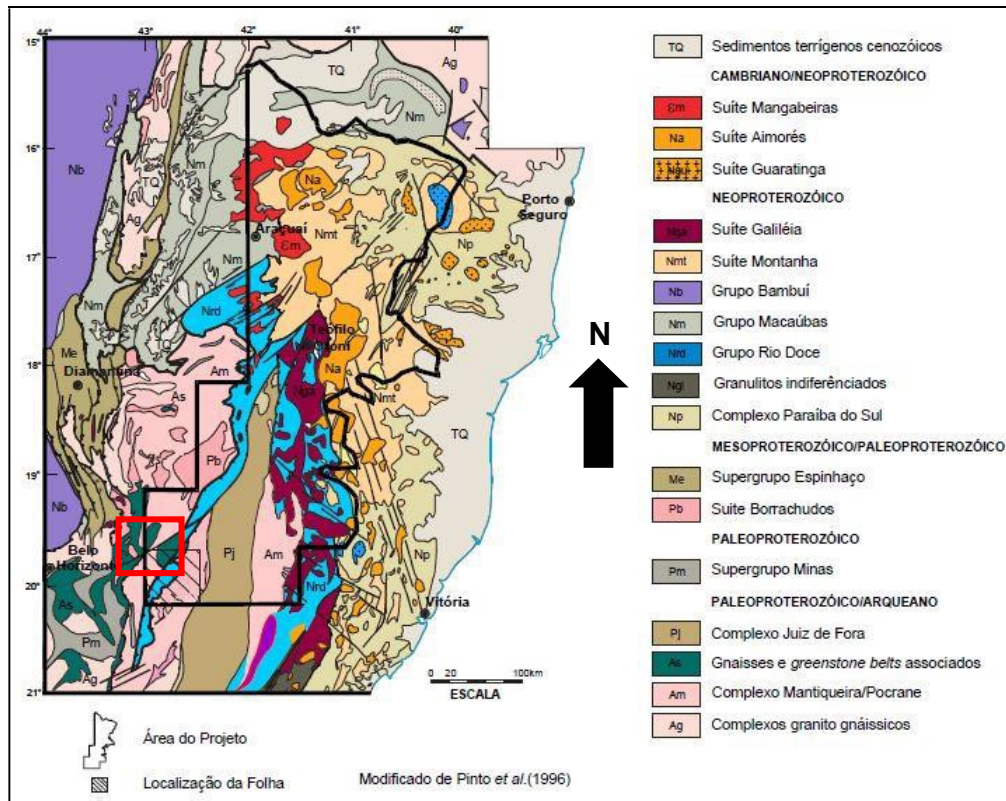
Pelotas. O Sistema Orogênico Mantiqueira se estende do sul da Bahia ao Uruguai, totalizando uma área de cerca de 700.000 km<sup>2</sup>. Este sistema é constituído pelos Orógenos Araçuaí, Ribeira, Dom Feliciano e São Gabriel, e pela zona de interferência entre os Orógenos Brasília e Ribeira (HEILBRON, 2004). Sendo importante ressaltar que a área de estudo situa-se mais especificamente nas proximidades da Faixa Araçuaí.

A elaboração conceitual que levou à definição do Orógeno Araçuaí- Congo Ocidental apareceu em Pedrosa-Soares & Noce (1998) e foi detalhada por Pedrosa Soares e Wiedemann-Lenonardos (2000) e Pedrosa Soares et al. (2001), que o caracterizaram como Orógeno derivado de uma bacia parcialmente oceanizada, cujo processo de subducção da litosfera oceânica se deu no sentido do Cráton do Congo. Esta caracterização do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental viabilizou-se após a descoberta de remanescentes ofiolíticos neoproterozóicos (PEDROSA-SOARES et al., 1992, 1998), e de estudos que identificaram a Suíte Galiléia e correlatos como representantes do arco magmático neoproterozóico (PINTO et al., 1997; ARACEMA et al., 2000; NOCE et al., 2000).

A Faixa de Dobramentos Araçuaí localiza-se na margem sudeste do Cráton do São Francisco, orientada aproximadamente na direção N-S, com vergência para oeste e transporte tectônico para o Cráton. As principais unidades litoestratigráficas são representadas pelo embasamento, de idade arqueana a paleoproterozóica, os metassedimentos paleo/mesoproterozóicos do Supergrupo Espinhaço, o Supergrupo São Francisco, Neoproterozóico, rochas de afinidade granítica do estágio colisional brasileiro e unidades fanerozóicas (UHLEIN, 1991). O metamorfismo regional aumenta de oeste para leste, gradando da fácies xisto verde baixo a fácies anfibolito alto (PEDROSA SOARES & WIEDEMANN, 2000).

De acordo com Silva (2000), na área de estudo são identificados litotipos atribuídos aos Complexos Mantiqueira (gnaisse TTG, com rochas máficas e ultramáficas associadas) e Guanhães (seqüência metavulcanossedimentar do tipo greenstone), ao Supergrupo Rio das Velhas (seqüência metavulcanossedimentar do tipo greenstone), ao Supergrupo Minas (nas proximidades de Itabira predominam essencialmente as formações ferríferas bandadas), bem como a Suíte Borrachudos (granitóides tipo-A), predominante na área de estudo, sendo o conjunto localmente atravessado por corpos pegmatíticos (Figura 2). Vale ressaltar que, Complexo Guanhães, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e Suíte Borrachudos pertencem ao Cráton São Francisco e o Complexo Mantiqueira pertence a Faixa Araçuaí. Já os corpos pegmatíticos ocorrem em ambas as Províncias Geotectônicas.

## Mineralogia e gemologia: causas de cor e aspectos comerciais dos cristais de quartzo de cor natural e obtida por irradiação gama (Cobalto-60) da região de Antônio Dias-MG



**Figura 2** -Mapa litoestratigráfico apresentando a localização do Projeto Leste – CPRM na Província Mantiqueira (preto), com ênfase na localização da Folha Coronel Fabriciano (preto hachurado) e com destaque para a área do presente estudo em Antônio Dias (vermelho) (Modificado de SILVA, 2000). Fonte: Modificado de Pinto et al. (1997).

O quartzo é o mais comum dos polimorfos de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e, graças aos seus cristais grandes, transparentes e bem formados, é conhecido desde os tempos antigos. As principais variedades cristalinas do quartzo são: quartzo hialino ou cristal de rocha, quartzo leitoso, fumê, roxo (ametista), preto (morion), verde (prásio), etc (LOBATO, 2009). Essas variedades são usadas como gemas e ornamentação.

Segundo Barbosa (2009), a gênese dos depósitos de quartzo gemológico está relacionada a três ambientes geológicos principais: pegmatitos graníticos, veios hidrotermais e drusas em basalto. No caso específico da região em estudo, os cristais de quartzo são encontrados em pegmatitos graníticos.

Segundo Pagnan (2016), comumente, impurezas na forma de íons estão presentes no quartzo substituindo o silício por Al e Fe. Segundo Rossman (1994), tal substituição causa um desequilíbrio eletrônico, por esses cátions possuírem valência  $3+$ , diferentemente do Si que possui valência  $4+$ . Tal desequilíbrio faz com que compensadores eletrônicos ou íons alcalinos como  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{H}^+$ , se instalem na vizinhança dos tetraedros na busca de um rápido restabelecimento do equilíbrio.

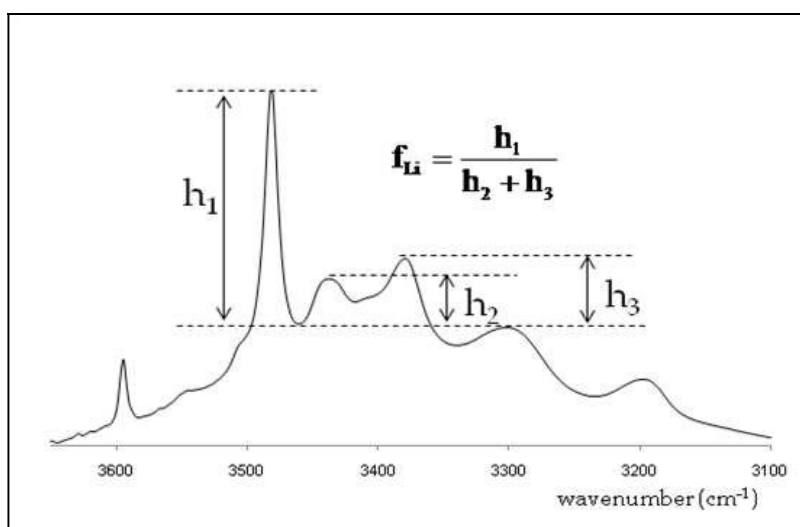
Os centros de cor são defeitos eletrônicos na estrutura do cristal que absorvem a luz, produzindo bandas específicas de absorção que irão proporcionar cor ao material (GÜTTLER & HENN, 2009). Eles também podem ser causados usando radiação gama emitida pelo Cobalto-60 (BARBOSA, 2009). De acordo com Pagnan (2016), a formação do centro de cor se dá por uma vacância eletrônica que se cria no orbital não ligante de um íon oxigênio adjacente ao alumínio.

De acordo com Guzzo et al. (1997), o centro de cor Al-Li é responsável pela coloração do quartzo fumê em ambientes pegmatíticos, enquanto que em ambientes hidrotermais, o

centro de cor responsável pela coloração é o Al-OH. Mackey (1963) determinou que a partir de padrões de espectros de ressonância paramagnética eletrônica em cristais de quartzo fumê irradiados, nos quais um cátion monovalente, situado nas redondezas do íon  $Al^{3+}$ , encontrava-se associado com o Al substitucional, constituindo assim, um centro de cor tipo  $[AlO_4/M]^{0}$ , onde  $M = H^+, Na^+$  ou  $Li^+$ .

A técnica Espectroscopia no Infravermelho utilizando a técnica de Transformada de(FTIR) foi escolhida para caracterizar os cristais de quartzo no presente estudo. Essa técnica é muito utilizada para estudar o comportamento e a presença da água e hidroxila em sólidos como também as absorções ligadas ao estiramento de ligações interatômicas (ENOKIHARA, 2013). No caso da presença de água em materiais, a Lei Beer-Lambert permite relacionar diretamente a concentração das moléculas da  $H_2O$  ou  $OH$  com a intensidade dos picos de absorbância obtidas dos espectros de FTIR. No presente trabalho esse método é utilizado com o intuito de determinar quais são os elementos cromóforos que podem dar cor ao quartzo após o processo de tratamento, ou seja, ele faz uma análise qualitativa. Consequentemente, essa técnica é capaz de determinar quais serão as variedades gemológicas de quartzo geradas, a partir dos tratamentos por irradiação e temperatura. Os dados gerados através da análise FTIR são interpretados utilizando como parâmetro a Tabela 1, elaborada por Lameiras (2012).

De acordo com Nunes & Lameiras (2005), se o fator de Lítio (fLi) estiver na faixa  $1,0 \leq fLi \leq 2,0$ , as amostras podem desenvolver cores intensas, dependendo da área abaixo do espectro entre  $3000\text{ cm}^{-1}$  e  $3600\text{ cm}^{-1}$ . Por outro lado, se  $fLi < 1,0$ , as amostras desenvolveram cores fracas e sem valor comercial. Além disso, o fLi é calculado a partir da razão entre a intensidade da banda característica do Lítio ( $3483\text{ cm}^{-1}$ ) e a soma das intensidades das bandas do Sódio ( $3433\text{ cm}^{-1}$ ) e Hidrogênio ( $3389\text{ cm}^{-1}$ ) (Figura 3).



**Figura 3** - Cálculo do Fator de Lítio (fLi). Os valores de  $h_i$  são as alturas medidas em unidade de área (u.a.), que são normalizados a partir da subtração da linha base. Fonte: NUNES & LAMEIRAS, (2005).

A área abaixo do espectro é calculada de acordo com a fórmula mostrada pela Equação 1 (NUNES & LAMEIRAS, 2005):

$$\text{area} = \int_{3000\text{ cm}^{-1}}^{3600\text{ cm}^{-1}} h(w) \cdot dw \quad (1)$$

## Mineralogia e gemologia: causas de cor e aspectos comerciais dos cristais de quartzo de cor natural e obtida por irradiação gama (Cobalto-60) da região de Antônio Dias-MG

Onde  $h(w)$  são os picos em unidade de área em determinados números de onda. A área é mensurada a partir do conteúdo de elementos traço, ou seja, quanto maior a área, maior é o conteúdo de elementos traço.

A Tabela 1 mostra as bandas que podem ser observadas no quartzo à temperatura ambiente, variando entre  $2400\text{ cm}^{-1}$  e  $3650\text{ cm}^{-1}$ , faixa de interesse no FTIR.

**Tabela 1** - Bandas FTIR observadas no espectro do quartzo à temperatura ambiente. Fonte: LAMEIRAS (2012). Fonte: LAMEIRAS (2012).

Nº da banda	Nº de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Observação
1	2499	Forte, sempre presente
2	2600	Forte, sempre presente
3	2677	Forte, sempre presente
4	2771	Forte, sempre presente
5	2935	Pequena banda, sempre presente
6	3063	Pequena banda, sempre presente
7	3202	Pequena banda, sempre presente de Si-O
8	3303*	Pequena banda, sempre presente de Si-O
9	3381*	Relacionada a Al-OH
10	3433*	Relacionada a Al-OH/Na+
11	3483*	Relacionada a Al-OH/Li+
12	3404*-510* doublet	Sem atribuição
13	3441* and 3585 doublet	3441 $\text{cm}^{-1}$ é uma banda larga
14	3441* and 3585 doublet	3441 $\text{cm}^{-1}$ é uma banda larga com forte absorção
15	3595	Sem atribuição

(\*) A posição dessas bandas pode sofrer variação de mais ou menos  $10\text{ cm}^{-1}$ .

A irradiação é a exposição de uma gema aos efeitos de uma radiação para alterar a cor. Há várias fontes de radiação usadas para esse fim: raios gama, raios x, irradiação por nêutrons e aceleradores de partículas (BRANCO, 2008). O método de irradiação por raios gama foi escolhido para esse estudo, pois ele apresenta boa penetração na gema, cor final com boa uniformidade e não deixa resíduo radioativo.

Segundo Favacho et al. (2010), esse método utiliza como fonte da radiação o Cobalto-60. As principais gemas melhoradas em sua cor por este processo são: quartzos incolores naturais (cristais) que passam para quartzos verdes (olive, green-gold, prasiolita), ametistas, citrinos laranja, laranja amarronzados, amarelos, quartzo fumê e morion, berilos incolores (goshenitas) que passam a morganitas, berilo verde, e heliodoro, espodumênios - principalmente kunzita que tem seu róseo intensificado, topázios incolores que passam a topázios azuis e turmalinas de cor rosa e vermelha que têm suas cores acentuadas. Outro fator relevante é que o Brasil figura, no cenário mundial, como um dos principais produtores de variedades coloridas de quartzo utilizando o método de irradiação gama (Cobalto-60) aplicado em geral no quartzo hialino (incolor) de regiões brasileiras (FAVACHO et al., 2010).

Segundo Favacho et al. (2010), o quartzo irradiado é o mineral do futuro nenhum outro mineral será capaz de gerar grandes diversidades coloridas a partir do seu espécime incolor. O quartzo que era considerado material de segunda linha hoje em dia é visto como uma gema estratégica para a fabricação de grandes quantidades de jóias. Por outro lado, é também o mineral gemológico mais abundante da crosta terrestre. Além disso, é uma excelente opção para quem trabalha com produção de jóias em série e que visa à exportação em larga escala, pois o mesmo pode ser conseguido em grandes quantidades e por preços mais acessíveis, além de permitir a ousadia do designer em criar peças com pedras de tamanhos mais acentuados e com disponibilidade de combinação de diferentes cores e tons (FAVACHO et al., 2010).

De acordo com Favacho et al. (2010), o preço final de uma gema irradiada está em função de diferentes fatores, tais como; preço de processo (tempo de máquina ou dosagem

aplicada), do valor pago pelo material na lavra no ato da compra (se em bruto, serrado, ou martelado), do mercado consumidor do produto, da moda vigente, da demanda do produto, da logística entre o local de extração e o local de beneficiamento, da eventual perda com a irradiação (em um lote irradiado sempre existem amostras que não respondem ao processo, o que gira em algo de 30 a 40% do total) e subsequente tratamento térmico entre outros fatores.

## METODOLOGIA

O trabalho foi dividido em 3 etapas principais, descritas abaixo:

Na primeira etapa ocorreu a revisão sobre os aspectos geológicos de forma regional e local, envolvidos na gênese dos cristais de quartzo, da região de estudo. Bem como, sobre as características mineralógicas dos cristais de quartzo, a teoria da causa das cores do quartzo, o método de caracterização por espectroscopia de Infravermelho utilizando a técnica de Transformada de Fourier (FTIR) e o espectro de interesse para o estudo do desenvolvimento de cores no quartzo. Além disso, foi feito um levantamento de informações sobre as principais técnicas de tratamento de gemas, mas com destaque para o tratamento por irradiação (Cobalto-60). Já com relação ao ponto de vista econômico foi revisado sobre o beneficiamento por meio da lapidação tradicional e lapidação diferenciada, além dos aspectos comerciais do quartzo irradiado.

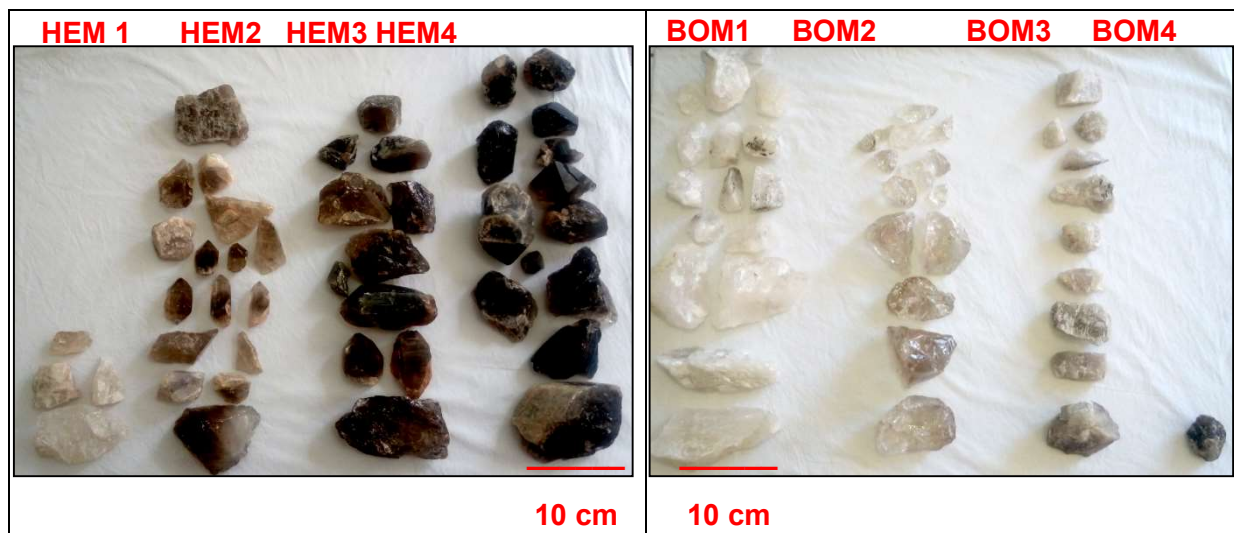
A Segunda etapa consistiu na atividade de campo, propriamente dita, onde foram coletadas as amostras de cristais de quartzo de origem pegmatítica no município de Antônio Dias – MG, descrito os aspectos geológicos do quartzo e marcados espacialmente os pontos de coleta com o auxílio de um Gps Garmin Gpsmap 64sc. Os materiais utilizados para a realização dessa etapa foram: GPS, caderneta de campo, marreta, perneira, chapéu, lupa e automóvel. Além disso, os cristais foram marcados de acordo com a localidade de coleta, sendo divididos em dois grupos: HEM e BOM, coletados em pegmatitos presentes no distrito Hematita e na Fazenda da Bomba, respectivamente.

Na terceira e última etapa, primeiramente, nessa etapa, foi feita a limpeza das amostras de quartzo em água corrente e detergente. Após o processo de limpeza foi realizada a separação dos cristais de quartzo em grupos de acordo com a localidade de ocorrência e com a sua respectiva cor. Sendo os cristais de quartzo do distrito Hematita separados em 4 grupos: HEM1 (hialino), HEM2 (levemente fumê), HEM3 (fumê) e HEM4 (morion). Já os cristais de quartzo da Fazenda da Bomba, foram divididos em 4 grupos: BOM1 (leitoso), BOM2 (hialino), BOM3 (levemente fumê) e BOM4 (fumê) (Figura 4). Foi coletado cerca de 6 kg de quartzo de Hematita e 4 kg da Fazenda da Bomba. Após a separação dos cristais em grupos, as amostras com a maior transparência de cada grupo foram selecionadas para serem levadas para análise pela espectroscopia no infravermelho utilizando a técnica de transformada de Fourier (FTIR) no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN) na UFMG. A partir dos dados da FTIR, foi gerado um gráfico para cada grupo de amostras no Microsoft Office Excel e foi verificado, no intervalo entre  $2500\text{ cm}^{-1}$  e  $3900\text{ cm}^{-1}$ , que alguns cristais possuíam elementos cromóforos que poderiam gerar novas cores a esses minerais, logo, eles foram separados para a irradiação. Além disso, esses gráficos do FTIR são importantes para a caracterização dos cristais de quartzo do município de Antônio Dias. O processo de irradiação gama (Cobalto-60) foi realizado no Laboratório de Irradiação Gama (LIG) do CDTN/CNEN, sob os cuidados do Pesquisador Dr. Fernando Soares Lameiras, nos cristais selecionados da etapa supramencionada (aproximadamente 3 kg no total), com a intensidade de 100 kGy em todas as amostras. Como a maioria dos cristais de quartzo irradiados, de ambas as localidades, adquiriram ou intensificaram a tonalidade fumê, obtendo tons comerciais, não foi necessário levá-los para o posterior tratamento térmico. Nessa mesma etapa foi realizado o relatório final que apresenta as principais informações obtidas nesse



## Mineralogia e gemologia: causas de cor e aspectos comerciais dos cristais de quartzo de cor natural e obtida por irradiação gama (Cobalto-60) da região de Antônio Dias-MG

presente estudo, bem como o mapa de localização da área de estudo e mapa de pontos de coleta do quartzo, com o auxílio do software ArcGIS 10.4. E por fim, foi gerado o seminário para a defesa do trabalho.



**Figura 4** - Divisão em grupos, de acordo com a cor, dos cristais de quartzo de Hematita (HEM1, HEM2, HEM3, e HEM4) e dos cristais da Fazenda da Bomba (BOM1, BOM2, BOM3 e BOM4), antes do processo de irradiação. Fonte: Autores.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### QUARTZO DO DISTRITO HEMATITA

Os cristais de quartzo que ocorrem no distrito Hematita são euédricos a subédricos, bem facetados, podem chegar a 20 centímetros de comprimento e são apresentados nas variedades hialina, fumê e morion. A mineralogia essencial dos pegmatitos dessa região é composta por grandes cristais de quartzo, caulinita, biotita e muscovita, além de cristais de topázio. Vale ressaltar também que, nos garimpos visitados, os garimpeiros usam o quartzo fumê como mineral guia para a prospecção de topázio. Além disso, é necessário que o quartzo seja euédrico e facetado para indicar proximidade com o topázio gemológico. O quartzo, desse local, tem sua gênese relacionada a corpos pegmatíticos graníticos centimétricos a métricos, correlacionados diretamente com os granitos/gnaisses da Suíte Borrachudos, que são muito comuns na região de estudo e podem ser encontrados muito alterados para argilominerais (principalmente caulinita).

Os garimpos nas proximidades de Hematita são abundantes em decorrência da grande quantidade e variedade de gemas encontradas nesse distrito do município de Antônio Dias. O principal garimpo visitado para a elaboração desse trabalho foi o garimpo da Fazenda Trindade e as estradas vicinais que dão acesso a esse garimpo também forneceram informações importantes sobre os pegmatitos geradores de quartzo.

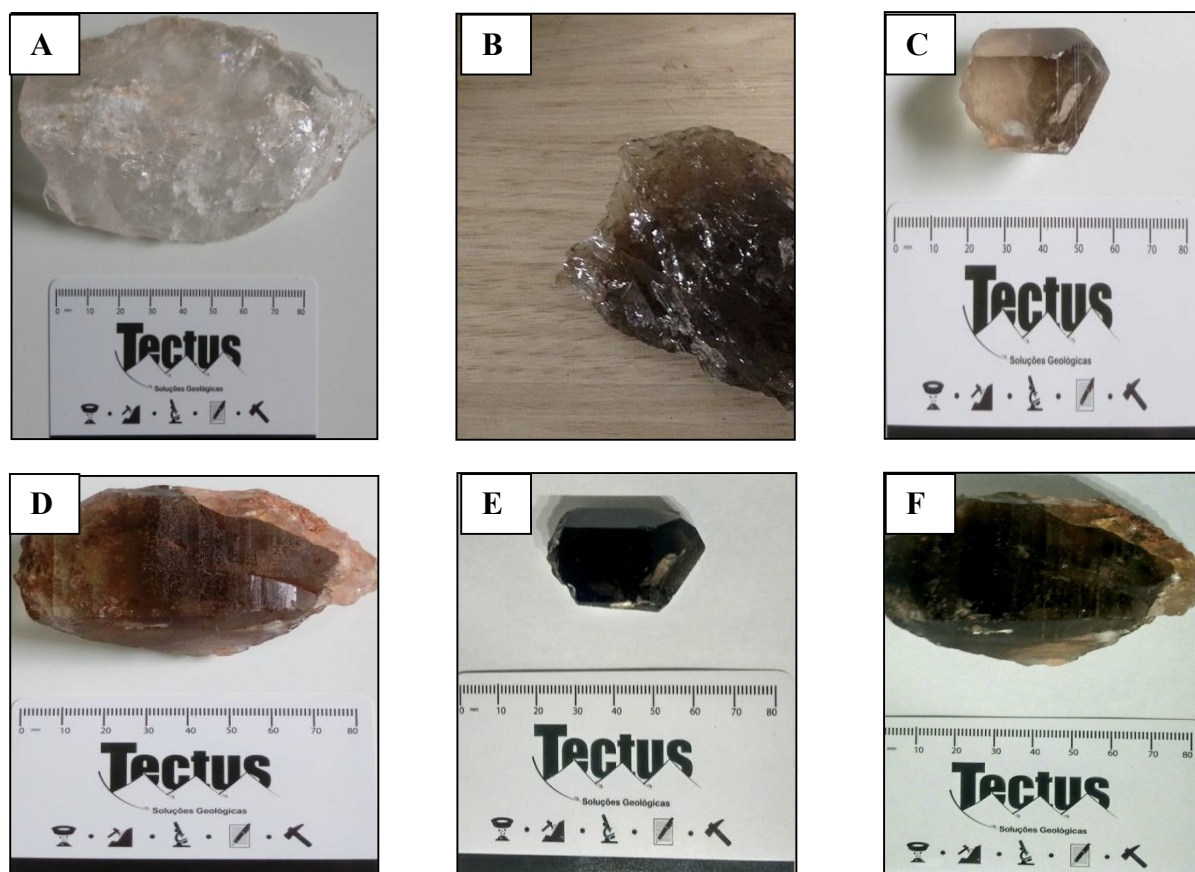
As amostras de quartzo do distrito Hematita foram divididas em 4 grupos de acordo com a intensidade de cor (HEM1 – hialino; HEM2 – levemente fumê; HEM3 – fumê; HEM4 – morion). A partir disso, cada grupo seria caracterizado, a partir dos gráficos obtidos através da FTIR, separadamente, com o intuito de entender a causa da variação de cores do quartzo e quais os elementos cromóforos desse mineral.

Com relação aos dados obtidos a partir do FTIR, os grupos HEM1, HEM2 e HEM3 apresentaram absorção nas bandas características do quartzo (2499, 2600, 2677, 2771, 2935, 3063, 3202, 3303 cm<sup>-1</sup>), além de um pico, bem marcado, próximo ao n° de onda 3381 cm<sup>-1</sup>,

que é característico da ligação química Al-OH. Dessa forma é possível identificar que o Alumínio (Al) é o elemento cromóforo que causa o tom fumê nos cristais de quartzo do distrito Hematita. Porém, essa tonalidade varia entre as amostras, principalmente, em função da quantidade de irradiação natural que esses cristais receberam. Outro fator relevante, é que a quantidade de impurezas de Al pode ser variável entre as amostras, causando também diferentes intensidades da cor fumê. Vale ressaltar que, as amostras mais transparentes dos três grupos analisados obtiveram melhores resultados no FTIR. Além disso, não foi possível caracterizar as amostras do grupo HEM4, pois elas são muito opacas.

Como as amostras não apresentaram impurezas do elemento químico Lítio (Li), o fator de Lítio obtido após a análise dos gráficos do FTIR foi igual a 0 (zero). Além disso, o valor da área para os grupos HEM1, HEM2 e HEM3 é, respectivamente, de 63,0081; 38,6148; 48,1256. Sendo o valor da área diretamente proporcional a quantidade de impurezas presentes no mineral é possível perceber que os cristais do grupo HEM1 têm maior conteúdo de impurezas de Alumínio em relação aos outros grupos analisados.

As amostras dos grupos HEM1, HEM2 e HEM3, foram irradiadas com a dosagem de 100 kGy (Figura 5). Os cristais dos grupos HEM1 e HEM2 obtiveram excelentes resultados com criação ou homogeneização da cor, após a irradiação. Como as amostras do grupo HEM4 são muito opacas elas não foram levadas para a irradiação.



**Figura 5** - Resultado do tratamento por irradiação dos grupos HEM1 (A e B), HEM2 (C e D), HEM3 (E e F) (esquerda sem o beneficiamento e direita beneficiada). Fonte: Autores.

## Mineralogia e gemologia: causas de cor e aspectos comerciais dos cristais de quartzo de cor natural e obtida por irradiação gama (Cobalto-60) da região de Antônio Dias-MG

### QUARTZO DA FAZENDA DA BOMBA

Os cristais de quartzo que ocorrem na região da Fazenda da Bomba são euédricos a anédricos, centimétricos e apresentados nas variedades leitoso, hialino, levemente fumê e fumê. O pegmatito em que ocorrem essas variedades de quartzo (25%) apresenta grande quantidade de feldspato (45%) (muitas vezes alterado para caulinita), muscovita (15%), biotita (10%) e pseudomorfos de granada (5%). A rocha é encontrada, principalmente, nos topos de morro, tendo contato abrupto com os granitos/gnaisses da Suíte Borrachudos e os gnaisses do Complexo Mantiqueira, podendo ser até na forma de enclaves desses litotipos no pegmatito. Além disso, o pegmatito já foi interesse de diversos garimpeiros da região com o intuito de lavar água marinha de qualidade gemológica (comunicação verbal).

As amostras de quartzo da Fazenda da Bomba foram divididas em 4 grupos de acordo com a intensidade de cor (BOM1 – leitoso; BOM2 – hialino; BOM3 – levemente fumê; BOM4 – fumê). A partir disso, cada grupo seria caracterizado, a partir dos gráficos obtidos através da FTIR, separadamente, com o intuito de entender a causa da variação de cores do quartzo e quais os elementos cromóforos desse mineral.

O grupo BOM2 foi o único a ser analisado no FTIR, pois é o único grupo da Fazenda da Bomba que apresentou a transparência necessária para a análise, os demais grupos são muito opacos para serem utilizados. Com relação ao resultado obtido no grupo BOM2, ele apresentou absorção nas bandas características do quartzo (2499, 2600, 2677, 2771, 2935, 3063, 3202, 3303  $\text{cm}^{-1}$ ), além de um pico, bem marcado, próximo ao  $n^\circ$  de onda 3381  $\text{cm}^{-1}$ , que é característico da ligação química Al-OH e um pequeno pico de absorção por volta do  $n^\circ$  de onda 3483  $\text{cm}^{-1}$ , que é típico da ligação Al-OH com Li. Dessa forma o Alumínio é o principal elemento cromóforo, mas, o Lítio também tem uma pequena participação como impureza nos cristais de quartzo da Fazenda da Bomba.

Como as amostras, do grupo BOM2, apresentaram uma pequena quantidade de impurezas do elemento químico Lítio (Li), o fator de Lítio obtido após a análise dos gráficos do FTIR foi igual a 0,1. Além disso, o valor da área do grupo BOM2 é 43,0874, sendo esse valor considerado moderado, logo as amostras desse grupo apresentam uma quantidade moderada de impurezas.

As amostras do grupo BOM2 foram irradiadas com a dosagem de 100 kGy (Figura 6). Como as amostras dos grupos BOM1, BOM3 e BOM4 são muito opacas elas não foram levadas para a irradiação.



**Figura 6.** Resultado do tratamento por irradiação do grupo BOM2 (esquerda sem o beneficiamento e direita beneficiada). Fonte: Autores.



## ASPECTOS COMERCIAIS

Os cristais de quartzo morion irradiados dos grupos HEM2 e BOM2 apresentam o nome comercial de quartzo black. Essas variedades gemológicas apresentam um grande valor agregado no estado bruto, sendo as correspondentes irradiadas do quartzo morion natural do grupo HEM4. Quando esses minerais são lapidados tradicionalmente podem obter valores ainda maiores e por fim a lapidação diferenciada pode gerar peças de grande valia para o mercado de gemas e jóias, desde que não apresentem muitas fraturas e/ou inclusões. Com relação à valorização de preço do quartzo, inicialmente, incolor/levemente fumê para quartzo black, após a irradiação, é cerca de 5 vezes o preço inicial. Lembrando que depois de lapidado esse valor sobe muito. Outro fator relevante é que o preço da irradiação desse material é praticamente o mesmo valor do quartzo bruto adquirido na lavra. Mas, mesmo comercializando o material bruto ele ainda se torna lucrativo, desde que não se tenha grandes gastos com transporte.

Os cristais de quartzo fumê irradiados dos grupos HEM1, HEM2 e HEM3 apresentam o nome comercial de quartzo fumê. A obtenção dessa variedade irradiada, no estado bruto, já é uma valorização no preço de mercado desse mineral. Além disso, quando lapidado tradicionalmente, esse cristal ganha ainda mais valor agregado e quando é realizada uma lapidação diferenciada o preço cresce de forma exponencial, desde que não apresente muitas fraturas e/ou inclusões. Com relação à valorização de preço do quartzo, inicialmente, incolor/levemente fumê para quartzo fumê, após a irradiação, é cerca de 2 vezes o preço inicial. Lembrando que depois de lapidado esse valor sobe muito (cerca de 250 vezes). Outro fator relevante é que o preço da irradiação desse material é muito baixo (em média 1US\$/ 1 Kg). Mas, mesmo comercializando o material bruto ele ainda se torna lucrativo, desde que não se tenha grandes gastos com transporte.

O quartzo leitoso do grupo BOM1 pode ser utilizado para a indústria de gemas e jóias, desde que quando fraturado em pequenas porções obtenha uma maior transparência. Caso contrário esse mineral pode ser utilizado na indústria de fabricação de materiais à base de silicone, em cristais com maior pureza.

Os cristais de quartzo dos grupos BOM3 e BOM4 são muito opacos e muito fraturados, logo ainda não apresentam aplicações importantes no mercado. Vale ressaltar também que, essas variedades são as menos comuns no corpo pegmatítico da Fazenda da Bomba, não trazendo grandes perdas de material a um possível minerador.

## CONCLUSÃO

Com relação aos aspectos geológicos das ocorrências de quartzo, esse mineral é encontrado no Campo Pegmatítico Ferros-Antônio Dias (pertencente ao Distrito Pegmatítico de Santa Maria de Itabira), onde está mais precisamente a área de estudo, na zona mural e no núcleo dos pegmatitos. Porém, é importante perceber que o quartzo do núcleo é anédrico, muitas vezes leitoso e opaco, ou seja, ele não apresenta as características necessárias de um quartzo gemológico. Por outro lado, o quartzo incolor ou fumê, da zona intermediária, ocorre em grandes cristais euédricos. Devido a isso, o quartzo pode ser aproveitado perfeitamente como gema e receber tratamentos com o intuito de beneficiar sua cor.

Os cristais de quartzo do município de Antônio Dias-MG, de forma geral, escureceram após o processo de Irradiação Gama (Cobalto-60) com uma dose de 100 kGy. Através desse método, cristais inicialmente incolores a levemente fumê com cores esmaecidas, se transformaram nas variedades gemológicas quartzo fumê e morion com cores intensas e homogêneas. Essas tonalidades foram obtidas após a irradiação pelo fato de todos os cristais de quartzo analisados na Espectroscopia no Infravermelho utilizando a técnica de

## **Mineralogia e gemologia: causas de cor e aspectos comerciais dos cristais de quartzo de cor natural e obtida por irradiação gama (Cobalto-60) da região de Antônio Dias-MG**

Transformada de Fourier (FTIR) possuem o elemento químico Alumínio (Al) associado ao OH, sendo essa a causa da nova cor. O FTIR é um método de grande importância para a determinação de elementos cromóforos, porém, os teores exatos desses elementos não podem ser quantificados utilizando essa técnica, pois esse é um método qualitativo. Mas, para futuros estudos propõe-se a quantificação desses elementos através da espectrometria ICP-MS, que é um método quantitativo.

Diferente do que foi afirmado por Guzzo et al. (1997), a causa de cor do quartzo fumê de ambiente pegmatítico não necessariamente é devido à presença do centro de cor Al-Li, pois o quartzo da região de estudo é de ambiente pegmatítico e sua cor é causada pelo centro de cor Al-OH, assim como ocorre em cristais de quartzo fumê de ambiente hidrotermal. Mostrando assim que o centro de cor não é definido de acordo com o ambiente de formação e sim com a disponibilidade de elementos cromóforos no ambiente geológico de sua gênese.

Como todas as amostras de quartzo do município de Antônio Dias, analisadas na FTIR, apresentaram baixas concentrações de Lítio (Li), elas têm grande estabilidade da cor fumê e preta-amarronzada (morion), pois de acordo com Favacho (2000), a presença do elemento químico Lítio (Li) diminui a estabilidade de cor no quartzo fumê.

É importante ressaltar que é viável a comercialização dos cristais de quartzo do município de Antônio Dias – MG para a utilização na indústria de gemas e jóias, tanto no mercado interno, quanto no externo. Porém, é necessário que esses cristais sejam tratados por meio da Irradiação Gama (Cobalto-60) e obtenham cores intensas e homogêneas, sendo elas fumê ou preta-amarronzada (morion) e não apresentem muitas fraturas e/ou inclusões. Além disso, é importante ressaltar que o processo de lapidação diferenciada pode gerar um maior valor agregado a essas gemas e facilitar a comercialização das mesmas. Lembrando que a lapidação diferenciada é um aspecto de grande vantagem do quartzo em relação a outras gemas no comércio, pois esse tipo de lapidação pode trazer ao mercado formas inovadoras e inéditas, diferentemente das lapidações tradicionais. É relevante dizer que, o quartzo de Antônio Dias – MG pode se tornar uma gema forte ou extra, após o processo de lapidação, devido a sua homogeneidade e tonalidade de cor.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALKMIM, F. F.; BRITO NEVES, B. B.; CASTRO ALVES, J. A. **Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco: uma revisão.** In: DOMINGUEZ, J. M. L.; MISI, A (Ed.). O Cráton do São Francisco. SBG - Núcleo BA/SE, 1993. 45-62.

ALKMIM, F. F. **O que faz de um cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações Almeidianas ao delimitá-lo.** In: MANTESSO-NETO et al. (Eds.) Geologia do Continente Sul Americano. Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Becca, 2004. p. 17-35.

ALMEIDA, F. F. M. de. **O Cráton do São Francisco.** Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v.7, p.349-364, 1977.

ALMEIDA, F. F. M. de. **O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco.** In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, 1981, Salvador. Anais... Salvador: SBG, 1981, p. 1-10.

ALMEIDA, F. F. M.; LITWINSKI, N. **Província Mantiqueira - Setor Setentrional.** In: ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. (Eds). O pré-cambriano do Brasil. São Paulo: Edgard Blucher, 1984, p.282-307.

ARACEMA, L. W., NEVES, A. C., FERREIRA, J. C., PEDROSA-SOARES, A. C., LOBATO, L. M.; NOCE, C. M. **Novas evidências de remanescentes oceânicos na Faixa Araçuaí: As rochas metaultramáficas de São José da Safira**. Geonomos, 8 (1): 55-61. 2000.

BARBOSA, C. T. **A cor do citrino: efeito de irradiação e tratamento térmico**. 2009. 49 f. Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/118197>>.

BRANCO, P. M. **Dicionário de Mineralogia e Gemologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 608 p.

CRISTINI, D.; PEREIRA, E.; LIMA, A. de; MONTEIRO, E.; PENHA, R.; GONÇALVES, V. **Tecnologia empregada na radiologia industrial: revisão de literatura**. Boletim Científico do Instituto de Ensino e Pesquisa, Hospital São Camilo, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 18-24, 2011.

ENOKIHARA, C. T. **Estudo do quartzo verde de origem hidrotermal tratado com radiação Gama**. 2013. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. doi:10.11606/T.85.2013.tde-18022014-133514. Acesso em: 23 jun. 2017.

FAVACHO, M. D. S. **Variedades Gemológicas de Quartzo em Minas Gerais: Geologia, Mineralogia, Causas de Cor, Técnicas de Tratamento e Aspectos Mercadológicos**. 2000. 182 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2000.

FAVACHO, M. D. S.; CASTAÑEDA, C.; LICCARDO, A. **Capítulo 3: O Quartzo Gemológico**. In: CASTAÑEDA, C.; ADDAD, J. E.; LICCARDO, A. (Ed.) *Gemas de Minas*. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia – SBG-MG, 2001. p.52-73.

FAVACHO, M. D. S.; ASSUNÇÃO, F. C. R.; RANK, L.; PAZ, M. P. da; **Estudo da cadeia de suprimento do programa nuclear brasileiro - Relatório Parcial Irradiadores e Aplicações: Análise de oportunidades e desafios para o segmento de Irradiadores e Aplicações na Cadeia Produtiva de Gemas (Pedras Preciosas)**. Brasília: Centro de Gestão e Estudo Estratégicos, 2010. 78p.

GÜTTLER, R. A. S.; HENN, U. **Colour-Enhanced Quartz and its Identification: green, violet-blue and yellow-green quartz from Brazil**. Canadian Gemmologist, v. 30, n. 2, p.46-54, 2009.

GUZZO, P. L.; IWASAKI, F.; IWASAKI, H. **Al-related centres in relation to Y-irradiation (Response in natural quartz)**, Phys. Chem. Miner., v. 24, p.254-263. 1997.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, M.; SILVA, L.C.; TROUW, R.A.J.; JANASI, V.C. **A Província Mantiqueira**. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO NEVES, B.B. (Eds.). *Geologia do continente sulamericano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca. São Paulo: SBG, 2004. p. 203-234.

**Mineralogia e gemologia: causas de cor e aspectos comerciais dos cristais de quartzo de cor natural e obtida por irradiação gama (Cobalto-60) da região de Antônio Dias-MG**

INDA, H. A. V.; SCHORSCHER, J. H. D.; DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C.; HARALYI, N. C. E.; BRANCO, P. C. A.; RAMALHO, R. **O cráton do São Francisco e a faixa de dobramentos Araçuaí**. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; DERZE, G. R.; ASMUS, H. E. (Coords.). Geologia do Brasil. Brasília: DNPM, 1984. p. 194-284.

IWATA, S. A. **Aspectos Genéticos e Características Mineralógicas do Crisoberilo das Lavras de Esmeraldas de Ferros e Hematita – MG**. 2000. 131 f. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) – Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

LAMEIRAS, F. S. **The relation of FTIR signature of natural colorless quartz to color development after Irradiation and heating**. Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear. Comissão Nacional de Energia Nuclear Brasil. Infrared Radiation, 2012.

LOBATO, E. **Perfil do Quartzo - Desenvolvimento de estudos para elaboração do Plano Duodecenal (2010 - 2030) de Geologia, Mineração e Transformação mineral**. Ministério de Minas e energia (MME). 2009. 32 p.

MACHADO, G. A. A. **Jazidas de Esmeralda de Capoeirana e Belmont – MG: Geologia, Petrogênese e metalogênese**. 1998. 294 f. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) – Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998.

NEWMAN, D. T. de C. **Estudos mineralógicos e microtermométricos de algumas espécies mineralógicas oriundas de pegmatitos dos distritos pegmatíticos de Santa Maria de Itabira e Governador Valadares, Minas Gerais**. 2009. 318 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

NOCE, C. M., MACAMBIRA, M. B.; PEDROSA-SOARES, A. C. **Chronology of Neoproterozoic-Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí Belt, Eastern Brazil, based on single zircon evaporation dating**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v.30, n.1, p. 25-29. 2000.

NUNES, E. H. M.; LAMEIRAS, F. S. **The optical absorption of gamma irradiated and heat-treated natural quartz**. Materials Research, São Carlos, v. 8, n. 3, p. 305-308, 2005. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392005000300014&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392005000300014&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 08 jul. 2017.

NUNES, E. H. M. **Caracterização de Ametistas naturais**. 2008. 208f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

PAGNAN, A. S. **Técnicas de valorização do quartzo como matéria-prima do território brasileiro a ser aplicado no design de joias**. 2016. 160 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Design, Programa de Pós-graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; VIDAL, P.; MONTEIRO, R.; LEONARDOS, O. H. **Toward a new tectonic model for the Late Proterozoic Araçuaí (SE Brazil) - West Congolian (SW Africa) Belt.** Journal of South American Earth Sciences, v. 6, p. 33-47. 1992.

PEDROSA-SOARES, A.C.; NOCE, C.M. **Where is the suture zone of the Neoproterozoic Araçuaí-West-Congo orogen?** In: CONFERENCE ON BASEMENT TECTONICS, 14., 1998, Ouro Preto. UFOP, Extended Abstracts..., 1998. p. 35-37.

PINTO, C. P.; DRUMOND, J. B. V.; FÉBOLI, W. L. (coord.) **Projeto Leste, Etapa 1.** CPRM-COMIG, Belo Horizonte. 1997.

ROSSMAN, G. R. **The colored varieties of silica.** In: HANEY, P. J. (Ed.). Reviews in Mineralogy, v.29, 433-468, 1994.

SILVA, S. L. **Mapeamento geológico da folha Coronel Fabriciano (SE.23-Z-D-V) - escala 1:100.000. Projeto Leste, etapa II.** Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Companhia Mineradora de Minas Gerais. Mapa e texto explicativo, 71 p. 2000.

UHLEIN, A. **Transição cráton-faixa dobrada: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (ciclo brasileiro) no estado de Minas Gerais.** 1991. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991. doi:10.11606/T.44.1991.tde-27102015-092630. Acesso em: 09 jul. 2017.



## Capítulo 2

### Caracterização petrográfica e geoquímica de mármore situados no Sul do Espírito Santo

*Adeildo de Assis Costa Junior<sup>1</sup>, Edgar Batista de Medeiros Junior<sup>2</sup>, Rodson de Abreu Marques<sup>1</sup>*

## INTRODUÇÃO

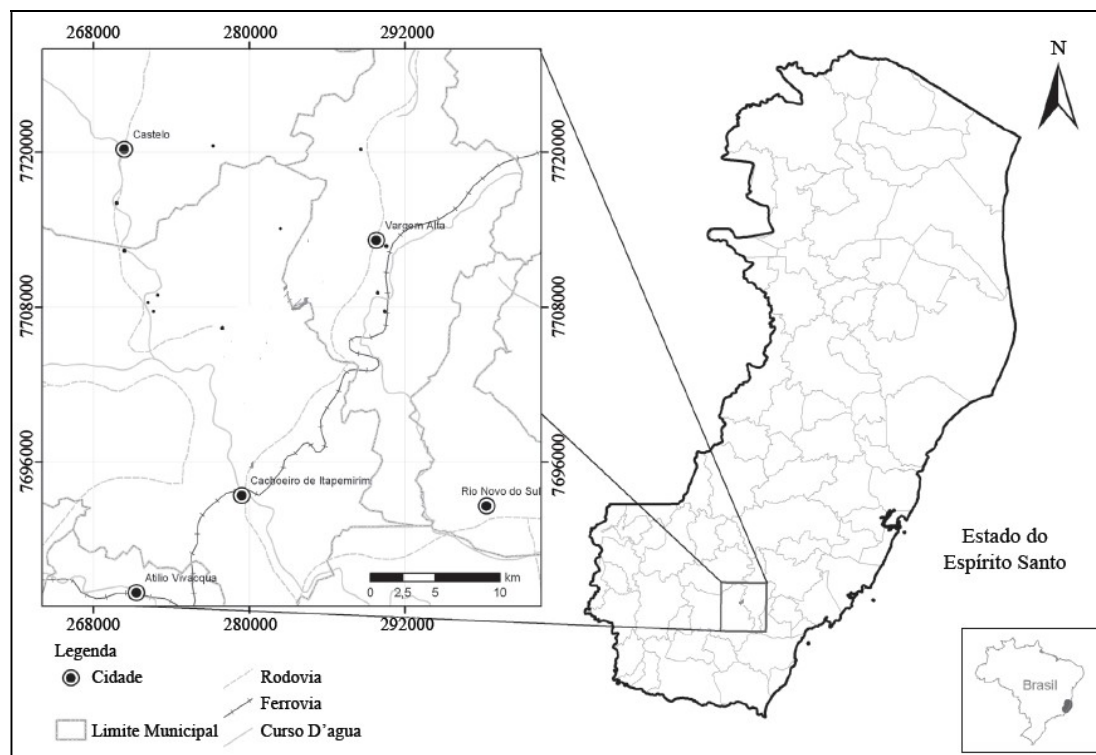
Dentre os Estados que compõe a região sudeste do Brasil, o Espírito Santo é o que apresenta maior carência de informações referentes ao conhecimento geológico. O mármore possui importância econômica, principalmente no setor de rochas ornamentais. O conhecimento químico e petrográfico deste litotipo são de suma importância para o entendimento de sua gênese. A caracterização química e petrográfica dos mármore desta região é o enfoque deste trabalho, para isso, utilizou-se a análise química de elementos maiores e identificação e descrição dos distintos minerais que compõem essas rochas.

## LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

O presente trabalho foi realizado no sul do Espírito Santo, as margens dos municípios de Cachoeiro de Itapemirim e Vargem Alta (Figura 1), mais precisamente nos distritos de Gironda, Itaóca, Santo Antônio e Prosperidade. Para acessar o local em questão, foi utilizada a estrada principal, ES-482, que segue da cidade de Alegre até Cachoeiro de Itapemirim. Para chegar até os pontos visitados, utilizou-se a rodovia do contorno e a estrada ES-164 além das demais vias urbanas acessíveis em cada área.

<sup>1</sup> Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo, CCENS, Alegre, ES

<sup>2</sup> Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG



**Figura 1** - Localização da área de estudo. Fonte: Silva (1993).

## **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA/GEOLOGIA REGIONAL**

As rochas carbonáticas ocupam, de fato, uma porção considerável da crosta terrestre e sua idade pode variar ao extremo, do Arqueano ( $> 2.5$  Ga) até o Quaternário ( $< 1.75$  Ma) (SAMPAIO e ALMEIDA, 2005). No Brasil, este tipo de rocha ocorre em larga escala e tem importância relevante para economia da nação, podem ser excelentes reservatórios de petróleo e água, além de servir de matéria-prima no setor de recursos minerais industriais para obtenção de cimento, corretivo de solo, entre outros. As rochas carbonáticas ainda servem de hospedeiras para grandes depósitos minerais, como por exemplo, depósito de Zn em Vazante, Minas Gerais (BIONDI, 2003). Para que ocorra a gênese de uma rocha carbonática, é preciso que advenham alguns acontecimentos, como a precipitação do carbonato de cálcio e/ou magnésio de forma orgânica e/ou inorgânica, substituição de outras substâncias pelo carbonato de cálcio e/ou magnésio e por fim, a litificação e diagênese (SANDERS e FRIEDMAN, 1967). Segundo os mesmos autores, o ambiente mais comum para deposição de sedimentos biodetríticos é marinho, podendo variar entre a porção rasa até as mais profundas.

A região estudada situa-se na Província Estrutural Mantiqueira (ALMEIDA 1977), mais precisamente, na interface entre a Faixa Ribeira e a Faixa Araçuaí. De acordo com Hasui et al. (1975), a Província Mantiqueira é subdividida em três segmentos distintos: setentrional, central e meridional. A porção setentrional corresponde a Faixa Araçuaí, setor central é composto pela porção sul da Faixa Brasília e as faixas Apiaí e Ribeira e segmento meridional inclui o Cinturão Dom Feliciano e o Terreno São Gabriel.

Segundo Brito & Cordani (1991) e Trompette (1994) o Orógeno Araçuaí- Congo Ocidental é uma unidade geotectônica edificada durante o brasiliano composta pela Faixa Araçuaí, no Brasil, e a Faixa Congo Ocidental, na África, sendo que sua limitação meridional em território brasileiro é medida no paralelo  $21^{\circ}\text{S}$  (PEDROSA-SOARES et al., 1992; PEDROSA-SOARES et al., 2000; PEDROSA-SOARES et al., 2001). Segundo Pedrosa-Soares et al. (2007), a contraparte brasileira do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental representa



dois terços da unidade orogênica e é composta pelo arco magmático pré-colisional, granitos sin- e pós-colisionais, remanescentes ofiolíticos e unidades metassedimentares de margem passiva e retro-arco.

O Orógeno Araçuaí contém quatro estágios orogênicos: Pré-colisional, sin-colisional, tardi-colisional e pós-colisional (PEDROSA-SOARES e WIEDEMANN-LEONARDOS 2000; PEDROSA-SOARES et al., 2001; PEDROSA-SOARES et al., 2007; HEILBRON et al., 2004; SILVA et al., 2005) (Figura 2). O estágio pré-colisional é representado pela Supersuíte G1 (630 - 580 Ma.), constituída essencialmente por tonalitos e granodioritos (PEDROSA-SOARES et al., 2007). O estágio sin-colisional/tardi-colisional é representado pela Supersuíte G2/G3. Os granitoides G2 são granitos do tipo-S, que são resultantes da fusão parcial de sedimentos aluminosos (PEDROSA-SOARES et al., 2007; ALKMIM et al., 2007). Os granitoides G3 são leucogranitos com granada e/ou cordierita, que são entendidos como a refusão de granitoide G2 (PEDROSA-SOARES et al., 2007). Por fim, tem-se o estágio pós-colisional caracterizado pelas supersuítas G4 e G5. Os granitoides G4 são de composição granítica e são caracterizados pela frequente preservação da cúpula pegmatítica (PEDROSA-SOARES et al., 2007). A Supersuíte G5 caracteriza-se por plútons compostos essencialmente por granitoides subordinadamente por rochas gabróicas, que apresentam evidências de mistura mecânica e química de magmas (WIEDEMANN-LEONARDOS et al., 2000; PEDROSA-SOARES et al., 2000; PEDROSA-SOARES et al., 2001).

De particular interesse, objetivou-se o estudo das carbonáticas que estão inseridas no Complexo Paraíba do Sul. As rochas desse Complexo estão situadas no Orógeno Araçuaí e Ribeira sendo representado por rochas metassedimentares (HEILBRON & MACHADO, 2003). No Espírito Santo as rochas carbonáticas ocorrem mais precisamente na porção sul do estado. A sua maior ocorrência se dá na forma de mega-lente de mármore (Figura 3), que se encontra intercalada com granitoides e orto- e paragneisses (VIEIRA, 1997). Segundo o mesmo autor, as unidades litoestratigráficas da área em questão são rochas dos domínios metavulcano-sedimentar e metassedimentar e intrusivas ácidas gnaissificadas. Gnaisses kinzigíticos, granada-sillimanita gnaisses, biotita gnaisses e biotita-anfibólio gnaisses que apresentam níveis de anfibolitos, quartzitos e mármore são as rochas correspondentes.

## Caracterização petrográfica e geoquímica de mármore situados no Sul do Espírito Santo

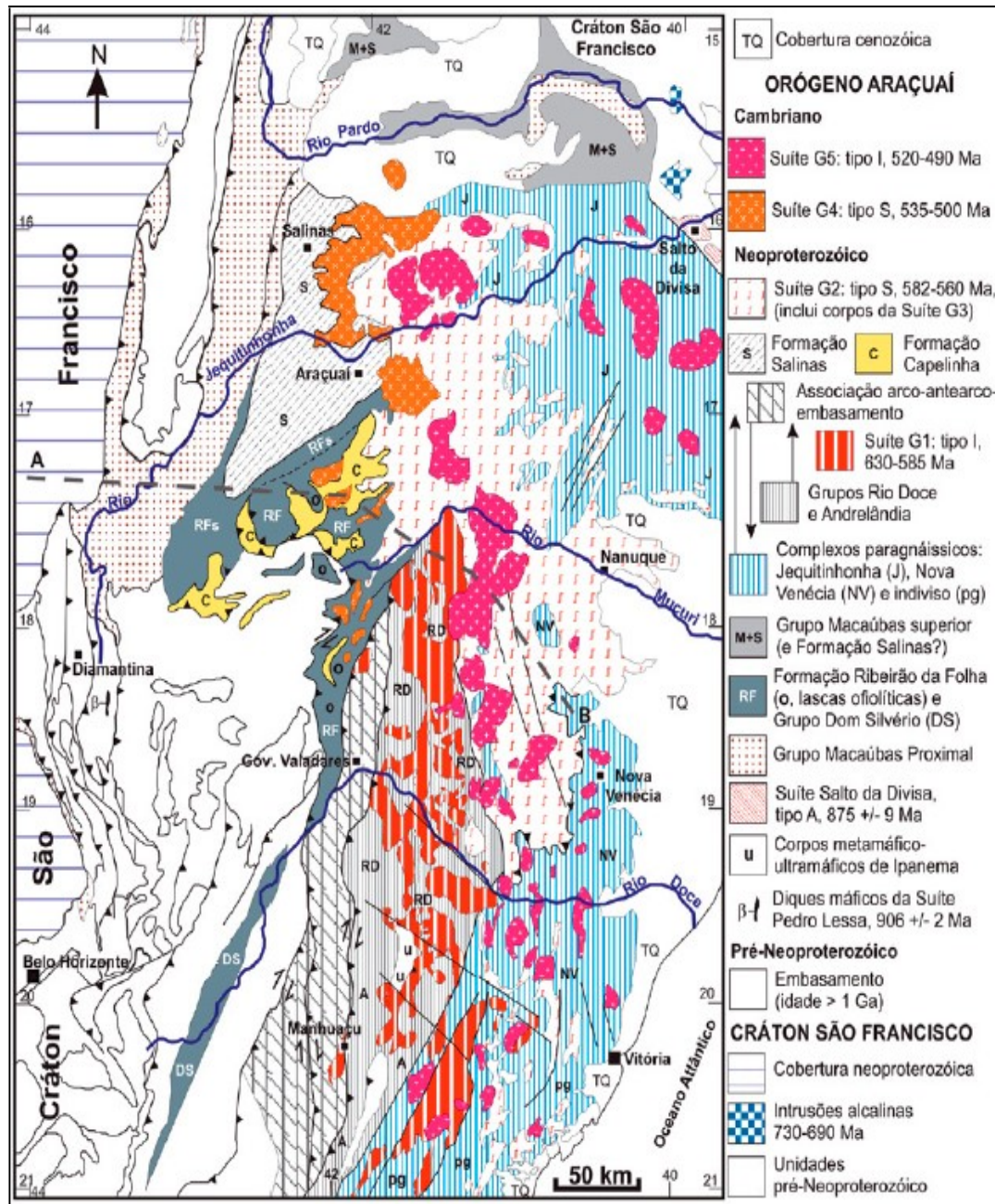
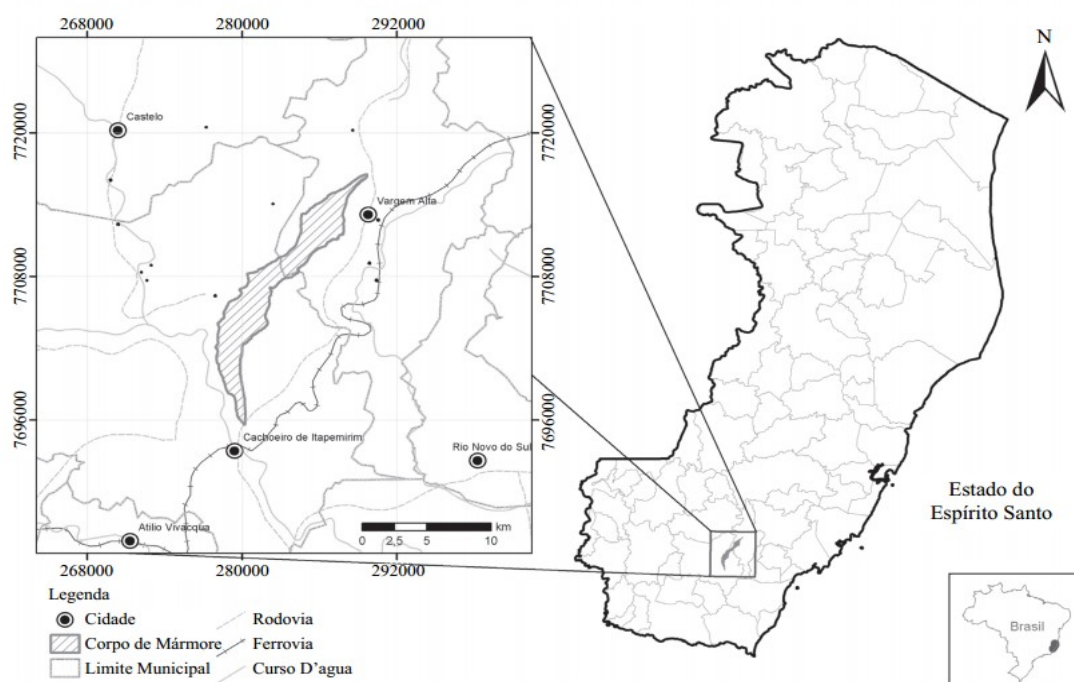


Figura 2 - Mapa do Orógeno Araçuaí. Fonte: Pedrosa Soares et al. (2007).



**Figura 3** - Lente de mármore do Complexo Paraíba do Sul. Fonte: Almeida et al (2012)

## METODOLOGIA

Foram escolhidos oito pontos amostrais situados na mega-lente de mármore no sul do ES. Quinze lâminas delgadas foram confeccionadas no laboratório de laminação no DEGEO/UFOP (Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto) para análise mineralógica e microtextural via microscópio óptico de luz transmitida. Todas as lâminas foram impregnadas com uma solução composta por alizarina vermelho e ácido clorídrico no intuito de auxiliar na diferenciação e quantificação de calcita e dolomita seguindo os critérios adotados por Adams et al. (1984). Este método foi realizado no laboratório de hidrogeologia do DGEL/UFES (Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo). Posteriormente, quatro amostras de mármore e uma amostra da rocha calcissilicática foram selecionadas para análises químicas de rocha total via espectrômetro de massa com Plasma Induzidas Acoplado (ICP-OES), realizadas no laboratório ACME (Analytical Laboratories LTD.).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em relação aos afloramentos rochosos, observaram-se diques de anfibolito e granito interagindo com o Mármore. Desta interação resulta a formação dos escarnitos. Em porções restritas do afloramento é possível observar níveis constituídos por grãos de carbonatos euédricoscentimétricos, que podem ser produtos de recristalização durante o processo metamórfico. O mármore apresenta como aspectos macroscópicos bandamentoscentimétricos marcados pela intercalação de bandas acinzentadas, compostas por carbonato de granulação grossa, e camadas brancas, constituídas por carbonato de granulação média. Foi possível observar também intercalações de camadas ricas em piroxênio, anfibólio e filossilicatos. Por vezes, este litotipo não exibe bandamento e possui coloração branca acinzentada devido à calcita/ dolomita. Outras colorações foram observadas, em níveis azulados e avermelhados,

## **Caracterização petrográfica e geoquímica de mármore situados no Sul do Espírito Santo**

essas distintas colorações são atribuídas a diferentes minerais, por exemplo, a escapolita é responsável pela coloração azul e a flogopita pela coloração vermelha nos mármore.

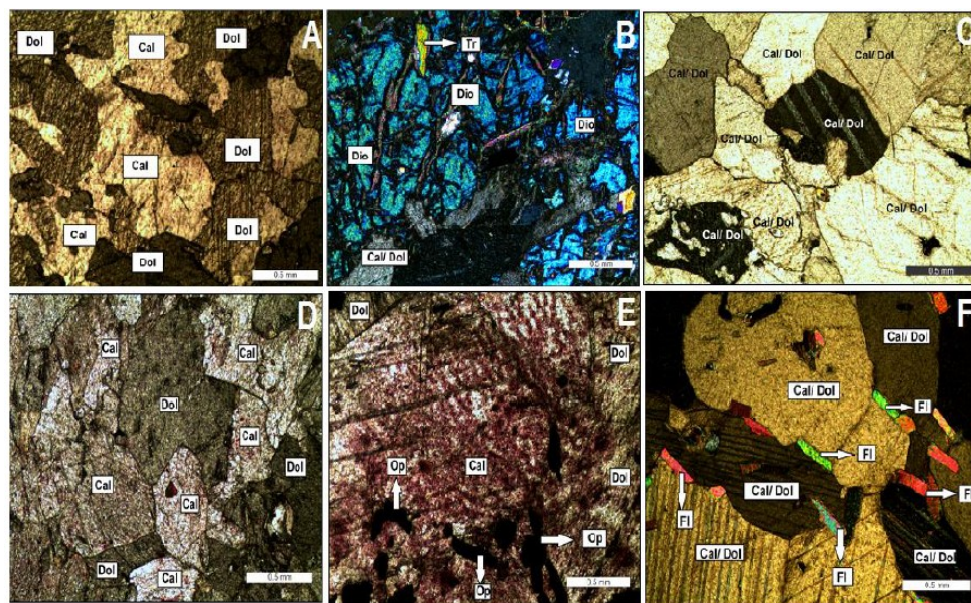
A descrição microscópica revelou que os mármore comumente apresentam textura granoblástica, com granulação variando de média a grossa. Por vezes, maclas e marca de dissolução são observadas nos grãos carbonáticos e sua composição mineralógica é dolomita e calcita como minerais principais; minerais acessórios encontrados são: tremolita, flogopitaescapolita, diopsídio e opacos (Figura 4). Para diferenciar calcita de dolomita, as lâminas delgadas foram impregnadas com alizarina vermelha. A calcita mostrou-se avermelhada após a impregnação, já a dolomita não alterou-se. Análise de proporção modal (Tabela 1) revela que no geral, a dolomita predomina na composição mineralógica dos mármore. Calcita aparece como o segundo mineral mais abundante, seguido do diopsídio, que assim como os dois minerais mais relevantes, aparecem em todas as lâminas analisadas. Tremolita, flogopita, escapolita e minerais opacos estão em quantidades menos significativas e não aparecem em todas as lâminas confeccionadas.

Foram selecionadas quatro amostras para a realização de análises químicas de rocha total via Espectrômetro de Massa com Plasma Induzidas Acoplado (ICP-OES), no laboratório Analytical Laboratories LTD. (ACME). As análises se restringiram aos elementos maiores e com base nas mesmas, observou-se valores relevantes de CaO ( $32,36 \pm 1,38\%$ ) e MgO ( $19,38 \pm 0,88\%$ ). Em termos de SiO<sub>2</sub>, há uma variação significativa entre as quatro amostras analisadas ( $5,68 \pm 4,86\%$ ), já os valores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $0,22 \pm 0,2\%$ ) e K<sub>2</sub>O são ínfimos e ( $0,01 \pm 0,01\%$ ) (Figura 5).

De acordo com a análise química dos litotipos estudados, foi possível classificá-los, utilizando o diagrama SiO<sub>2</sub>-CaO-MgO (BUCHER & FREY, 1994) (Figura 6). O diagrama em questão obtém cinco campos distintos. Os campos 1a, 1b e 1c representam a variação dos mármore dolomíticos a calcítico-dolomíticos. Os campos 2a e 2b representam as rochas calcissilicáticas. Os quatro mármore analisados encontram-se no campo 1a, ou seja, mármore magnesianos.

Com base na composição química, é possível estipular o protólito da rocha carbonática. A tabela 1 correlaciona o tipo de rocha carbonática de acordo com a composição química do protólito (HIBBARD, 1995). O sistema químico que deu origem a essas rochas é essencialmente o CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> (CMS-HC), o que caracteriza o protólito como um calcário dolomítico-silicoso. Entretanto, vale ressaltar que a ocorrência de flogopita e escapolita em diferentes amostras de mármore pressupõe um sistema mais complexo para o metamorfismo dos mármore, como o K<sub>2</sub>O-CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> (KCMAS-HC), cujo protólito sedimentar é uma margá. Em ambos os casos o ambiente sedimentar do protólito poderia ser marinho plataformar.



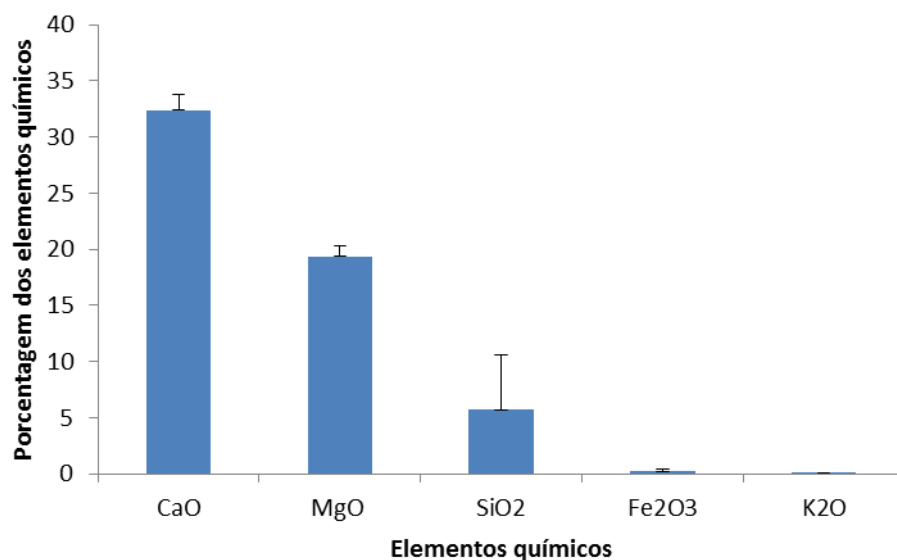


**Figura 4** - Prancha de lâminas delgadas dos mármore em luz polarizada. A - Diferenciação de calcita (Cal) e dolomita (Dol) após a impregnação de alizarina, calcita apresenta coloração mais avermelhada. B- Presença de diopsídio (Dio) e tremolita (Tr) em destaque. C- Maclas encontradas nos minerais carbonáticos (Cal/Dol equivale a Calcita/ Dolomita). D- Marcas de dissolução nos grãos de calcita e dolomita. E- Minerais opacos (Op) foram identificados bordeando a calcita. F- Flogopita (Fl) identificada no interstício dos grãos carbonáticos.

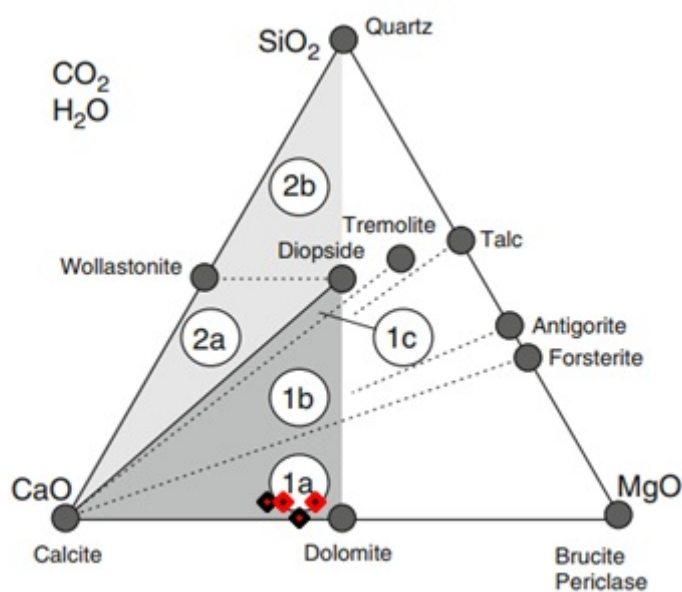
Fonte: Autores.

**Tabela 1** - Análise de proporção modal dos minerais. Fonte: Autores.

Amostras	Dolomita	Calcita	Diopsídio	Tremolita	Flogopita	Escapolita	Opacos	Total (%)
A1	65,0	18,4	3,0	13,6	-	-	-	100,0
A2	65,6	21,9	4,5	8,0	-	-	-	100,0
A3	59,2	15,8	7,0	5,0	-	-	23,0	100,0
A4	71,8	11,2	3,0	7,0	-	-	7,0	100,0
A5	56,6	18,4	13,0	12,0	-	-	-	100,0
A6	59,9	11,9	4,2	5,0	-	-	19,0	100,0
A7	60,4	14,6	23	2,0	-	-	-	100,0
A8	53,3	19,7	17,4	9,6	-	-	-	100,0
A9	47,1	28,9	4,0	6,5	-	13,5	-	100,0
A10	84,8	11,6	1,0	2,6	-	-	-	100,0
A11	26,1	3,9	50,0	10,0	-	10,0	-	100,0
A12	64,8	17,2	4,0	-	15,0	-	-	100,0
A13	59,2	19,2	6,0	-	13,0	2,0	-	100,0
A14	72,8	7,20	2,4	-	16,8	0,8	-	100,0
A15	63,2	16,8	2,5	-	17,5	-	-	100,0



**Figura 5** - Gráfico da média de teor dos elementos químicos maiores e o desvio padrão.  
Fonte: Autores.



**Figura 6** - Diagrama SiO<sub>2</sub>-CaO-MgO exibindo as amostras no campo 1a.  
Fonte: Modificado Bucher & Frey (1994).

**Tabela 2** - Tipos de rochas carbonáticas em função da composição química do protólito.  
Fonte: Modificado Hibbard (1995).

Tipode metamorfito	Sistema químico e óxidos principais	Protólito	Rocha metamórfica	Principais mineiras metamórficos
Carbonático	CM- C: CaO, MgO, CO <sub>2</sub>	Calcário, dolomito (Plataforma Continental)	Mármore	Calcita, dolomita
CarbonáticoSilicoso	CMS- HC: CaO, MgO, CO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	Calcário ou dolomito silicoso (plataforma Continental)	Calciossilicática, Mármore silicoso (carbonatos > 50%), Escarnito	Calcita, dolomita, quartzo, wollastonita, tremolita, diopsídio, forsterita, talco, periclásio, brucita
Carbonático Argiloso	KCMAS- HC: K <sub>2</sub> O, CaO, MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub>	Marga, folhelho (Plataforma Continental)	Calciossilicática, gnaiss, xisto, parafibolito, carbonática	Carbonatos, quartzo, silicatos de Mg e Ca, feldspato, escapolita, hornblenda, flogopita.

## CONCLUSÃO

Diques de anfibolito e intrusões graníticas, por vezes, foram encontrados nos mármore, em decorrência disto, houve a formação de escarnitos. O mármore pode ou não apresentar estrutura metamórfica (foliação) e o que define a coloração avermelhada e azulada em determinadas porções deste litotipo é a flogopita e escapolita, respectivamente. A descrição microscópica dos mármore releu a presença de dolomita, calcita, diopsídio, tremolita, escapolita, flogopita e minerais opacos. A análise química dos elementos maiores aponta um teor considerável de CaO e MgO, que estão presentes na composição dos minerais mais abundantes encontrados nestas rochas, calcita e dolomita, já o teor de SiO<sub>2</sub> é mais baixo se comparados aos supracitados, porém há uma considerável variação (1-10%). Utilizando o diagrama SiO<sub>2</sub>-CaO-MgO, definiu-se a característica magnesiânica dos litotipos analisados. Por fim, o sistema químico que deu origem a essas rochas varia de CMS-HC a KCMAS-HC, o que caracteriza um protólito de ambiente sedimentar marinho plataformar que possui

## **Caracterização petrográfica e geoquímica de mármore situados no Sul do Espírito Santo**

composição entre um calcário dolomítico-silicoso, quando se considera os mármore com níveis silicatados de piroxênio e anfibólio, e uma marga, para os mármore que contém flogopita e escapolita na sua constituição.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ADAMS A.E., MACKENZIE W.S., GUILFORD C. 1984. **Atlas of sedimentary rocks under the microscope**. Longman, Harlow, 140 pp.

ALKMIM F. F., PEDROSA-SOARES A.C., NOCE C.M., CRUZ S. 2007. **Sobre a Evolução Tectônica do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental**. Geonomos. 15: 25-43.

ALMEIDA F.F.M. 1977. **O Cráton do São Francisco**. *Revista Brasileira de Geociências*, 7:349-364.

ALMEIDA, C.N.; MELLO, E.F.; IZAQUE, D.M.; SILVA, P.D.; **Caracterização geológica e geoquímica das intrusões de rochas metamáficas nos mármore do Sul do Espírito Santo**. *Revista Brasileira de Geociências*, v(42), n(2), pp. 245-264, 2012.

BIONDI, J.C. 2003. **Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros**. 1º Ed. São Paulo: Oficina de Textos – CBMM, 1528pp.

BRITO-NEVES B.B., CORDANI U.G. 1991. **Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic-Precambrian**. *Res.*, 53:23-40.

BUCHER K. & FREY M. (Eds.) 1994. **Petrogenesis of Metamorphic Rocks**. Springer-Verlag, Berlin, 228p.

HASUI Y., CARNEIRO C.D.R., COIMBRA A.M. 1975. **The Ribeira folded belt**. *Revista Brasileira de Geociências*, 5:257-266.

HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; COIMBRA, A.M. **The Ribeira folded belt**. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 5, n. 4, p. 257-266, 1975.

HEILBRON M., MACHADO N. 2003. **Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira Orogen (SE Brazil)**. *Precambrian Research*, 125:87-112.

HEILBRON M., PEDROSA-SOARES A.C., CAMPOS-NETO M.C., SILVA L.C., TROUW R., JANASI V.A. 2004. **Província Mantiqueira**. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito-Neves (org.) *Geologia do Continente Sul-Americano*. São Paulo, Beca, cap. XIII, p.: 203-234.

HIBBARD, M.J. 1995. **Petrography to petrogenesis**. Pub. Prentice-Hall Inc, New Jersey, 587p.

PEDROSA-SOARES A. C., NOCE C. M., ALKMIM F. F., SILVA L. C., BABINSKI, M., CORDANI U. CASTAÑEDA C. 2007. **Orógeno Araçuaí: Síntese do Conhecimento 30 anos após Almeida 1977**. *Geonomos*, 15: 1-16.



PEDROSA-SOARES A.C & WIEDEMANN-LEONARDOS C.M. 2000. **Evolution of the Araçuaí Belt and its connection to the Ribeira Belt, Eastern Brazil**. In: Cordani, U.G., Milani E.J., ThomazFilho A., Campos D.A. (eds) Tectonic evolution of South America. Rio de Janeiro, p.: 265-285.

PEDROSA-SOARES A.C., NOCE C.M., VIDAL P., MONTEIRO R. & LEONARDOS O.H. 1992. **Toward a new tectonic model for the Late Proterozoic Araçuaí (SE Brazil) - West Congolian (SW Africa) Belt**. Journal of South American Earth Sciences, **6**: 33-47.

PEDROSA-SOARES A.C., NOCE C.M., WIEDEMANN C., PINTO C.P. 2001. **The Araçuaí- West-Congo Orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanaland Assembly**. Precambrian Research, **110**: 307-323.

SAMPAIO J.A & ALMEIDA S.L.M. 2005. **Calcário e Dolomito** (Capítulo 15). In: A.B da Luz & F.F. Lins (Eds), Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações. Rio de Janeiro, CETEM, p.: 327-350.

SANDERS J. E & FRIEDMAN G.M. 1967. **Origin and occurrence of limestone**. In: G.V. Chilingar, H.J. Bissel, R.W. Fairbridge (eds.) Developments in sedimentology **9A**. Caronate rocks, origin, occurrence and classification. Elsevier, Amsterdam, p.: 169-266.

SILVA J.N. 1993. **Programa Levantamento Geológicos Básicos do Brasil. Cachoeiro de Itapemirim. Folha SF.24-V-A-V. Estado do Espírito Santo. Escala 1:100.000. Brasília, DNPM/CPRM**. 176 p., ilustração, 2 mapas.

SILVA L.C., MCNAUGHTON N.J., ARMSTRONG R., HARTMANN L. & FLETCHER I. 2005. **The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections**. Precambrian Research, **136**: 203-240.

TROMPETTE R. 1994. **Geology of Western Gondwana (2000-500 Ma). Pan-African-Brasiliano Aggregation of South America and Africa**. A.A. Balkema, Rotterdam, 350pp.

VIEIRA, V.S. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos: Folha Cachoeiro do Itapemirim (SF 24 Z-V-A), Estado do Espírito Santo, Escala 1:250.000**. Brasília: Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 1997.

WIEDEMANN-LEONARDOS, C.M., LUDKA, I.P., MEDEIROS, S.R., MENDES, J.C. & MOURA, J.C. 2000. **Arquitetura de plútons zonados da Faixa Araçuaí-Ribeira**. Geonomos, **8**: 25-38.



### Capítulo 3

#### **Caracterização mineralógica dos resíduos minerários dispostos no setor capixaba do rio Doce, após o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG**

*Eduardo Baudson Duarte<sup>1</sup>, Fabricia Benda de Oliveira<sup>2</sup>, Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira<sup>3</sup>*

### INTRODUÇÃO

O Rio Doce, que percorre os Estados de Minas Gerais (porção leste) e Espírito Santo (porção norte) ao longo de uma grande bacia hidrográfica homônima, é caracterizado como sendo um ambiente fluvial de volumoso aporte sedimentar.

Em toda a sua extensão, o Rio Doce apresenta diversas obras de engenharia para a geração de energia elétrica, como por exemplo, a Usina Hidrelétrica de Aimorés/MG e de Mascarenhas em Baixo Guandu/ES, que consistem em barragens hídricas de contenção do canal. Também possui um longo histórico relacionado à extração mineral, principalmente no Estado de Minas Gerais, onde diversas barragens de rejeitos minerários estão associadas a alguns canais tributários, como por exemplo, a Barragem de Fundão, em Mariana/MG.

Com relação à extração de minério de ferro, esta localiza-se, geralmente, nas cabeceiras associadas ao Rio Piracicaba em território mineiro, sendo este um dos principais afluentes do Rio Doce (ANA, 2016). Desta forma, para armazenamento e contenção dos resíduos provenientes da lavra e beneficiamento de minério, foram implantadas diversas barragens de rejeitos vinculadas a esta região supracitada, como por exemplo, a barragem de Fundão no distrito de Bento Rodrigues, Mariana/MG.

Martins (2013) realizou um estudo sedimentológico, aliado a dados de sensoriamento remoto, em todo o segmento capixaba do Rio Doce a partir da UHE Aimorés, onde observou mudanças ocorridas ao longo do curso deste rio, fato observado pela modificação dos padrões texturais ao longo do canal, bem como no leito do rio, que foram comprovados através de análises dos sedimentos e interpretação de uma série multitemporal de imagens de satélite, respectivamente.

Com o recente desastre ambiental associado ao Rio Doce, oriundo do rompimento da barragem de Fundão localizada em Bento Rodrigues, distrito de Mariana/MG, que continha rejeitos minerários, viu-se necessário o seu estudo detalhado, visando uma futura avaliação ambiental.

É evidente que as atividades desenvolvidas pelo ser humano, como a extração mineral e processos de urbanização e industrialização, por exemplo, podem ocasionar fortes e, muitas vezes, irreversíveis impactos nos ecossistemas, modificando radicalmente as condições naturais. Com relação ao Rio Doce, o recente desastre ambiental ocasionado pelo rompimento da barragem de Fundão contribuiu para o desequilíbrio deste sistema fluvial, afetando tanto a fauna e a flora ali presentes, como também os padrões sedimentares originais (texturais e químicos). Deste modo, este trabalho fundamenta-se, principalmente, em fornecer informações mineralógicas dos resíduos minerários depositados ao longo de todo o segmento

<sup>1</sup> Mestrando em Agroquímica, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES

<sup>2</sup> Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo, CCENS, Alegre, ES

<sup>3</sup> Instituto Federal do Espírito Santo, *Campus Ibatiba*, Ibatiba, ES

## Caracterização mineralógica dos resíduos minerários dispostos no setor capixaba do rio Doce, após o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG

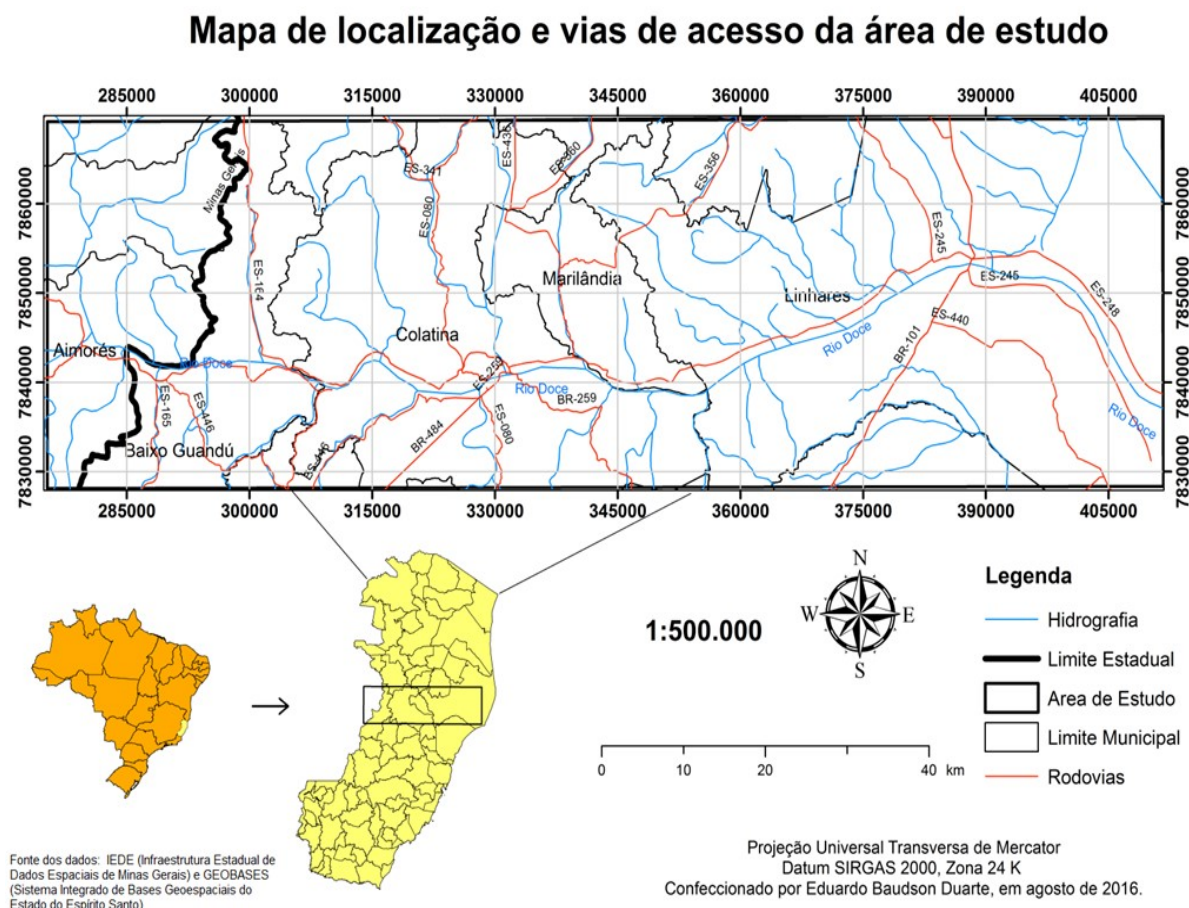
capixaba do Rio Doce, desde a UHE Aimorés/MG até sua foz localizada no distrito de Regência, em Linhares/ES, a partir da técnica de difratometria de raios-X (DRX).

### LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

O Rio Doce, que se encontra inserido em uma grande bacia hidrográfica homônima, é nomeado desta forma a partir da confluência de dois importantes rios do Estado de Minas Gerais, entre as cidades de Ponte Nova, Santa Cruz do Escalvado e Rio Doce, sendo eles os rios Piranga e do Carmo. As nascentes deste rio estão associadas às serras da Mantiqueira e do Espinhaço e o curso d'água principal percorre cerca de 888 km desde a nascente até a sua foz no Oceano Atlântico, localizada no distrito de Regência, em Linhares/ES (ANA, 2016).

De acordo com Ecoplan-Lume (2010), os principais tributários do Rio Doce, pela margem esquerda, são os rios do Carmo, Santo Antônio, Corrente Grande, Suaçuí Grande e Piracicaba, em Minas Gerais; Pancas e São José no Espírito Santo. Já pela margem direita são os rios Matipó, Casca, Manhauçu e Caratinga/Cuieté em Minas Gerais; Santa Joana, Guandú e Santa Maria do Rio Doce no Espírito Santo.

A principal via rodoviária associada à área de estudo é a ES-248, que margeia amplamente o rio (Figura 1).



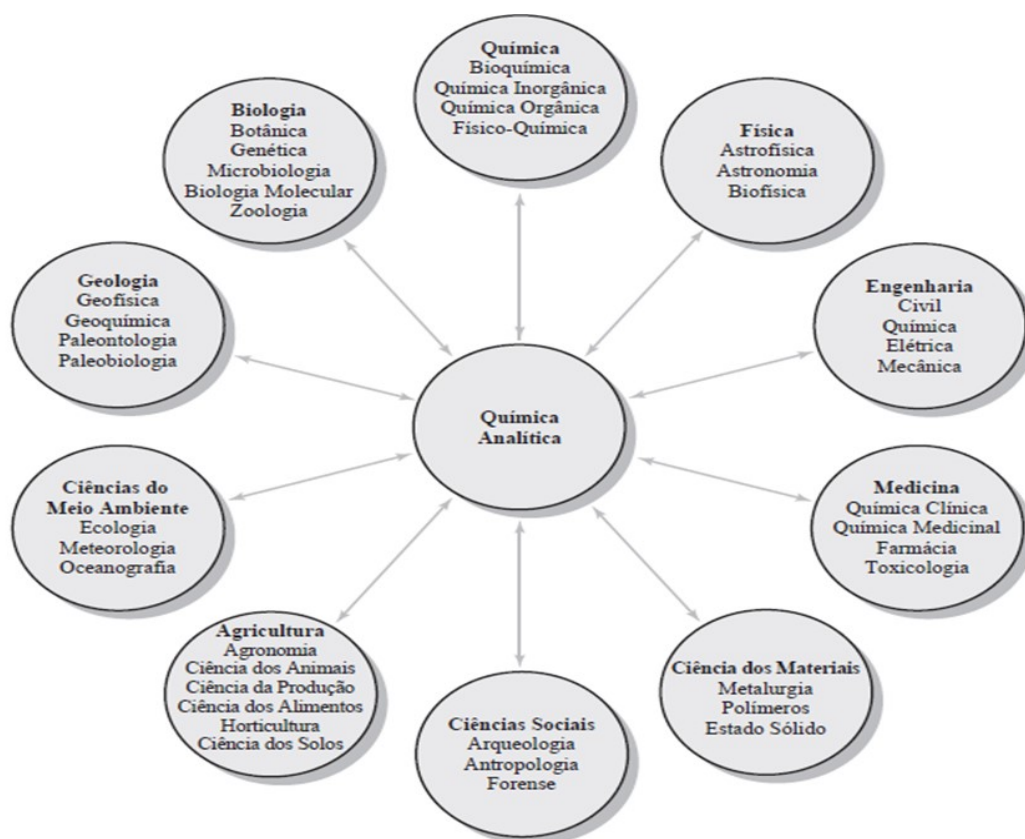
**Figura 1** - Localização da área de estudo. Fonte: Autores.

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA/GEOLOGIA REGIONAL

Os métodos referentes à química analítica assumem a responsabilidade de medição, representando um grande aglomerado de ideias e técnicas úteis em diversos campos científicos, sendo assim de natureza interdisciplinar, torna-se um mecanismo vital em inúmeras áreas acadêmicas em todo o mundo (Figura 2). A análise qualitativa determina a identidade das espécies químicas presentes em um conjunto amostral, tendo como exemplo clássico o método de difratometria de raios-X.

A difratometria de raios-X (DRX) é uma técnica de determinação de estruturas cristalinas bastante disseminada e utilizada. Com esta ferramenta analítica, no processo de geração de raios-X, elétrons são ejetados de um cátodo e acelerados por um campo magnético em direção a um ânodo, no qual se chocam sendo assim desacelerados, emitindo radiação mensurável na faixa de comprimento de onda dos raios-X. Esta radiação atua de forma contínua no que tange as frequências, que oscilam amplamente conforme os elétrons são desacelerados. Além disto, o choque entre elétrons e ânodo transfere aos elétrons do material analisado energia considerável para incrementá-los a um estado de maior energia. Contudo, a fim de se buscar a estabilidade, estes elétrons regressam aos estados não excitados, emitindo radiação decorrente da diferença entre os orbitais nos quais se move (FONSECA FILHO e LOPES, 2013). De acordo com os autores supracitados, a radiação emanada pelo ânodo atua como uma superposição de uma parte contínua e de faixas discretas estreitas, denominadas de picos, cujas frequências são específicas do material de que é constituído o ânodo, sendo comumente empregados os ânodos de cobre e molibdênio.

O fenômeno da difração ocorre quando um feixe de raios-X incide em um cristal fazendo com que átomos presentes interajam com o mesmo feixe. Desta forma, a difração de raios-X obedece a Lei de Bragg (Equação A), na qual se estabelece a associação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos cristalinos que a geraram (Figura 3), inerentes a cada fase cristalina (SPOMBERG, 2010). Sendo assim, quando entende-se a estrutura cristalina da amostra, pode-se inferir o padrão de difração criado pelo material (FONSECA FILHO e LOPES, 2013).



## Caracterização mineralógica dos resíduos minerários dispostos no setor capixaba do rio Doce, após o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG

**Figura 2** - Importância central da química analítica e interação com demais áreas científicas. Fonte: Skoog et al. (2006).

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (\text{Equação A})$$

Em que:

$n$ : número inteiro chamado de ordem de difração;

$\lambda$ : comprimento de onda do raio incidente em Angstrom (Å);

$d$ : distância interplanar;

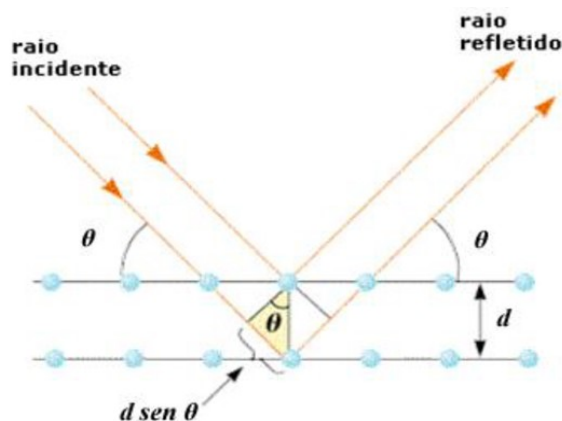
$\theta$ : ângulo de difração.

Em meio às vantagens do método de DRX, nota-se a facilidade e presteza no emprego da técnica analítica, a grande credibilidade dos dados obtidos, a chance de se analisar amostras heterogêneas, no que diz respeito às inúmeras fases cristalinas, e a análise quantitativa destas mesmas fases minerais (ABREU NETO, 2012).

O emprego desta técnica age de forma indispensável na designação de argilominerais, já que uma simples análise química apresentaria apenas os elementos químicos pertencentes ao material, e não a forma como estão interligados. Contudo, nesta mesma caracterização, a elevada quantidade de quartzo na amostra resulta em picos bem definidos e de grande intensidade no difratograma (ABREU NETO, 2012), ficando assim prejudicada a identificação das demais fases minerais.

A aplicação desta técnica, conforme experimento realizado por Santos e Costa (2013), contribuiu na identificação de argilominerais relacionados a diferentes amostras de caulim, como forma de avaliar a contribuição da caulinita em relação a importantes atributos químicos e mineralógicos dos solos. Monticeli et al. (2014) encontraram minerais expansivos nos estágios de alteração mais avançados em gnaisses, com a finalidade de compreender o comportamento geomecânico de maciços rochosos relacionados aos túneis da Estrada de Ferro Vitória/ES – Minas/MG.

Com relação à Bacia do Rio Doce, Silva et al. (2013) verificaram a composição geoquímica de amostras de sedimento na fração silte/argila em uma área afetada pela exploração aurífera no sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, no Alto Rio Doce (MG), com o intuito de avaliar a contaminação dos sedimentos por elementos traços, e encontraram teores alarmantes de arsênio e cádmio, que superaram todos os valores de referência analisados.



**Figura 3** - Representação ilustrativa da Lei de Bragg. Fonte: Spomberg (2010).

## METODOLOGIA

A seleção de pontos para amostragem baseou-se nas interpretações de uma sucessão multitemporal de imagens do sensor TM do satélite Landsat 5 nas órbitas 215 e 216, nos



pontos 73 e 74, e composição RGB 543, em período climático seco (MARTINS, 2013), aliando desta forma o sensoriamento remoto ao estudo sedimentológico. Foi mantida a mesma malha de amostragem empregada no trabalho citado (Figura 4), sendo esta realizada em barras de acumulações de sedimentos em um perfil longitudinal do Rio Doce, salvo o ponto 7, que foi incluído na malha de amostragem para um melhor detalhamento da área de estudo, uma vez que alguns pontos amostrados encontravam-se espacialmente distantes.

Desta forma, foram coletadas crostas siltoargilosas solidificadas observadas nas porções superficiais de bancos de areia em período seco, com estruturação semelhante à *mudcracks* (Figura 5A), com espessuras variáveis oriundas do rompimento da barragem de rejeitos de beneficiamento de minério de ferro.

A coleta foi realizada com o auxílio de uma pá de aço inoxidável revestida por material inerte. Por conseguinte, pelo material estar disposto de forma bastante superficial, a coleta foi realizada de modo direto, onde as crostas foram armazenadas em sacos plásticos devidamente identificados e virgens (Figura 5B).



**Figura 4.** Distribuição espacial dos pontos de amostragem em um perfil longitudinal do Rio Doce. Fonte: Autores.



**Figura 5 - A)** Crostas espessas de lama minerária semelhantes à *mudcracks*; **B)** Devida coleta do material, com o auxílio de uma pá e sacos plásticos virgens. Fonte: Autores.

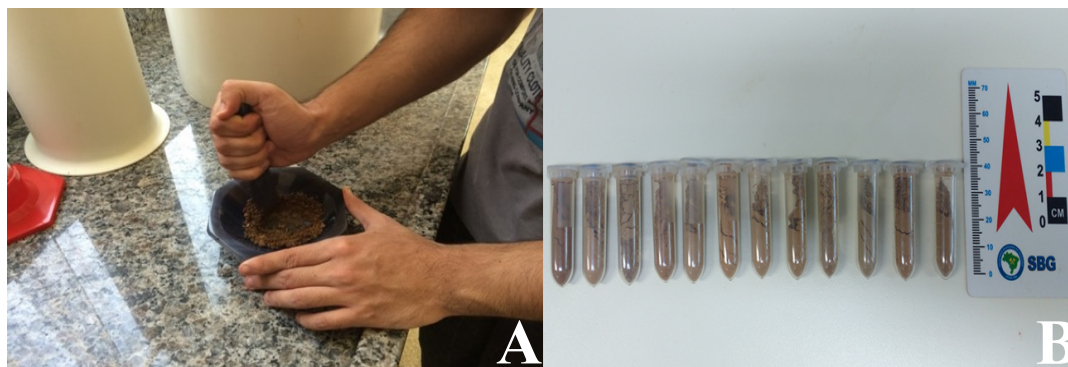
## Caracterização mineralógica dos resíduos minerários dispostos no setor capixaba do rio Doce, após o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG

A preparação do pó a ser utilizado na análise da especificidade mineralógica das amostras coletadas fundamentou-se numa secagem prévia das amostras, em estufa com temperatura de aproximadamente 50° C, por aproximadamente cinco horas.

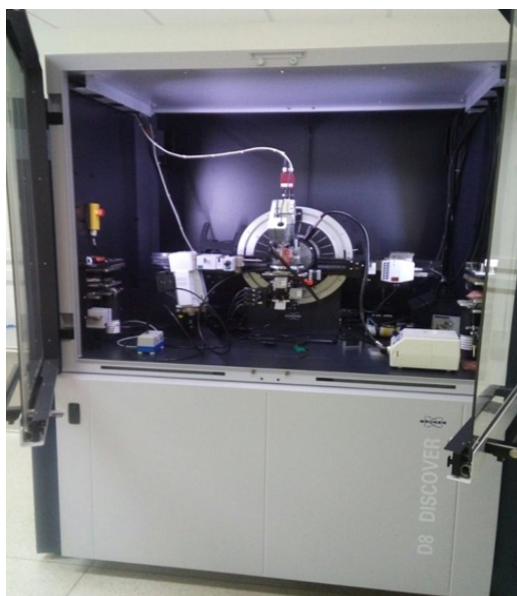
Com isso, 30 g de cada amostra foram maceradas em almofariz de ágata (Figura 6A) até atingirem a granulometria necessária a passagem na peneira de 325 mesh. Desta forma, separou-se cerca de 1 g de cada amostra, que foi acondicionada em microtubos (Figura 6B) para envio ao laboratório para análise.

As amostras foram analisadas em goniômetro Bruker D8 Discover (Figura 7), com tubos de raios-X de cobre, de velocidade de 0,3° 2 theta/min, sendo 2 theta variante entre 7° à 90°, com comprimento de onda de 1,5418 Angstrom (Å), controlado por sistema Bruker D8 Discover, acoplado a um computador. Possui potência estimada em 40 KV e 40 mA, estando presente no Laboratório Multiusuário de Difração de Raios-X, pertencente ao LabPetro no Centro de Ciências Exatas (CCE), localizado na Universidade Federal do Espírito Santo (Campus Goiabeiras). Posteriormente, os difratogramas gerados foram analisados e interpretados com o auxílio do software DIFFRAC.EVA V4.1.1 e bancos de dados associados a este.

Tal procedimento de preparação de amostra é similar ao empregado por Abreu Neto (2012), Santos e Costa (2013) e Silva et al. (2013) em seus trabalhos.



**Figura 6 - A)** Processo de cominuição das amostras de caráter preferencialmente siltico-argiloso, para a obtenção de alíquotas representativas; **B)** Acondicionamento das alíquotas de lama em microtubos na granulometria de 325 mesh. Fonte: Autores.





**Figura 7** - Goniômetro Bruker D8 Discover utilizado na análise mineralógica das amostras de lama oriunda do beneficiamento de minério de ferro, pertencente ao Laboratório Multiusuário de Difração de Raios-X da Universidade Federal do Espírito Santo (Campus Goiabeiras). Fonte: Autores.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a análise e interpretação criteriosa dos doze difratogramas associados às amostras coletadas de lama minerária, nota-se uma associação mineral amplamente presente dada pelos seguintes minerais: quartzo, minerais de ferro (goethita e/ou hematita), caulinita e muscovita.

Com o desastre ambiental decorrente do rompimento da Barragem de Fundão, que continha, segundo ANA (2016) rejeitos minerários não perigosos e não inertes compostos por sílica e óxido de ferro, minerais como quartzo, hematita e goethita seriam comumente encontrados associados à lama analisada.

Com relação ao quartzo, notam-se em todos os difratogramas picos característicos deste mineral em diferentes ângulos de incidência praticados na análise em questão, sendo o de maior intensidade encontrado em 27 graus, e outros amplamente presentes, como em 21, 50 e 39 graus, por ordem decrescente de intensidade dos picos de difração. Por se tratar de um mineral extremamente abundante na natureza e de alta resistência ao intemperismo e transporte, já era esperado a sua ocorrência em todo o conjunto amostral. Porém, a grande quantidade deste mineral nas amostras e seu elevado grau de orientação afetam amplamente na identificação e caracterização dos demais argilominerais presentes, dada a possível ocorrência de sobreposição de picos.

A goethita (hidróxido de ferro) apresenta o pico de maior intensidade em 22 graus, sendo que em 33, 37 e 18 graus, notam-se os picos de caráter secundário inerentes a este mineral. Já para a identificação da hematita (óxido de ferro), por apresentar picos de difração muito semelhantes àqueles encontrados na goethita, foi necessária uma análise bastante criteriosa.

Desta forma, a hematita apresenta o pico de maior intensidade em 33 graus, com picos secundários em 35, 54, 24 e 49 graus, em ordem decrescente de intensidade. Pelas características intrínsecas do tipo de rejeito, já eram esperados estes tipos de minerais, sendo que o processo de extração de ferro, bem como os resíduos gerados, concentra-se basicamente nestes dois minerais. Contudo, estes minerais são bastante comuns no próprio contexto geológico local, evidenciando também uma provável contribuição das rochas alteradas à carga sedimentar associada ao Rio Doce.

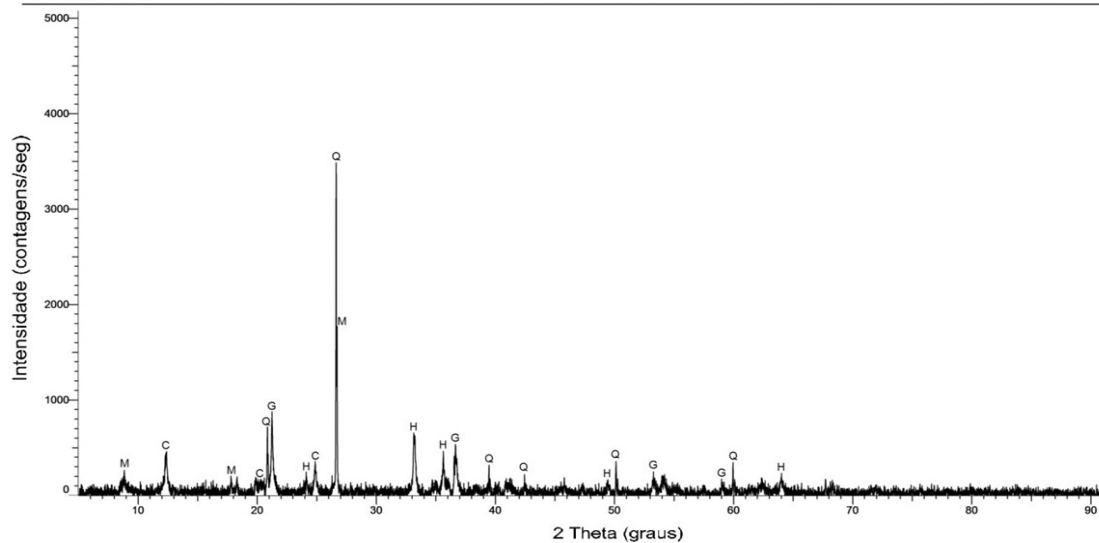
O único mineral de argila diagnosticado é a caulinita, caracterizado pelo pico de maior intensidade em 12 graus de ângulo de incidência e demais picos secundários de difração em 24, 20 e 38 graus, em ordem decrescente de intensidade. Este mineral provém provavelmente da alteração química de feldspatos e solos e, bem como qualquer outro mineral de argila, possui a capacidade de adsorção de elementos químicos disponíveis no meio.

O pico de maior intensidade relacionado à muscovita está intimamente relacionado ao pico de maior intensidade do quartzo, em ângulo de incidência equivalente a 27 graus. Caracteriza-se também por apresentar picos secundários em 8 e 17 graus, sendo que o primeiro é bem evidente em todos os difratogramas analisados, bem como àquele de ângulo de incidência igual a 27 graus.

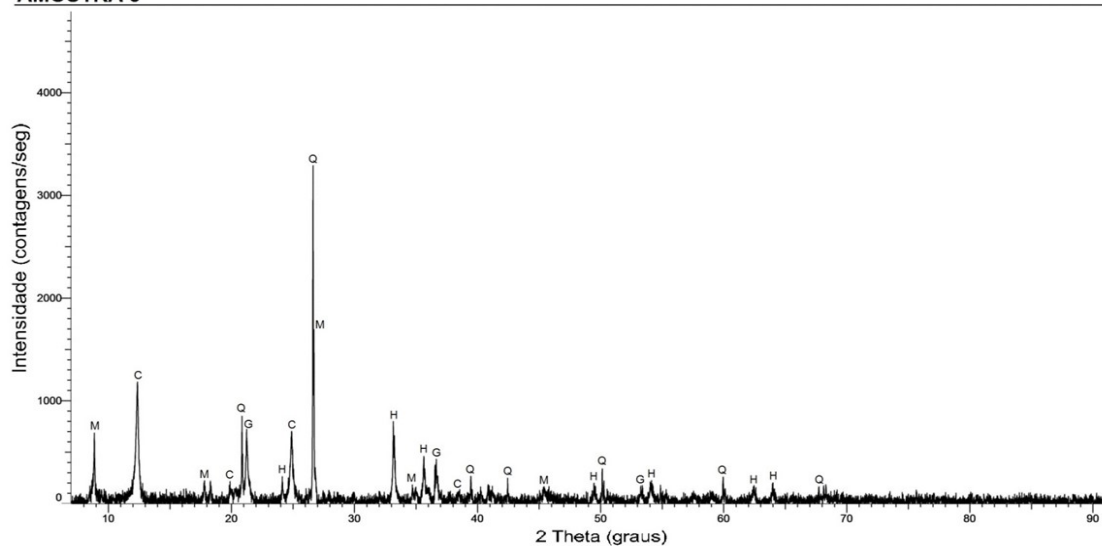
Abaixo tem-se alguns dos difratogramas gerados, considerados os mais relevantes para a análise, que exibem parcialmente ou totalmente a associação mineral supracitada (Figura 8).

# Caracterização mineralógica dos resíduos minerários dispostos no setor capixaba do rio Doce, após o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG

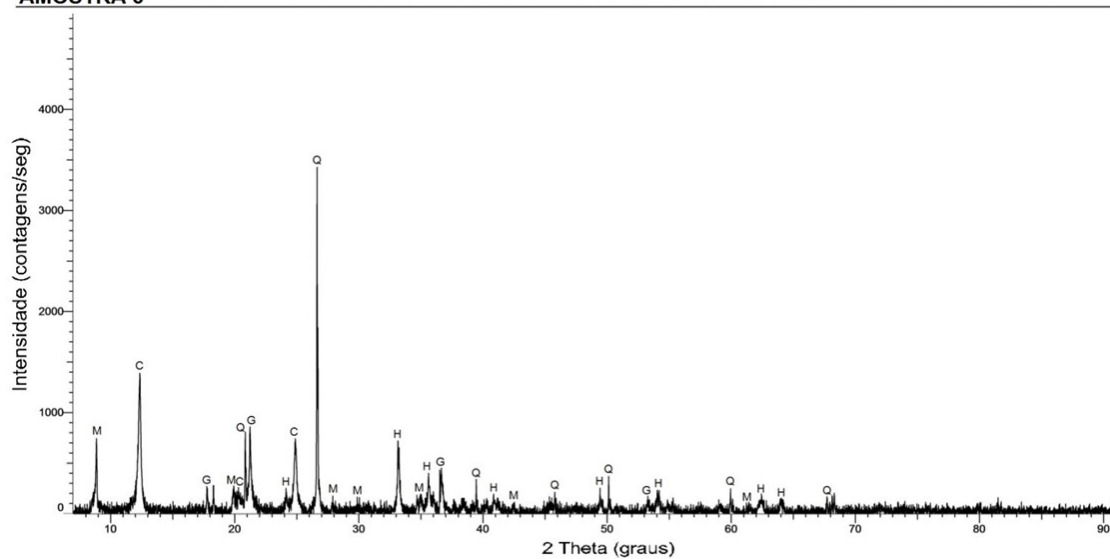
AMOSTRA 1

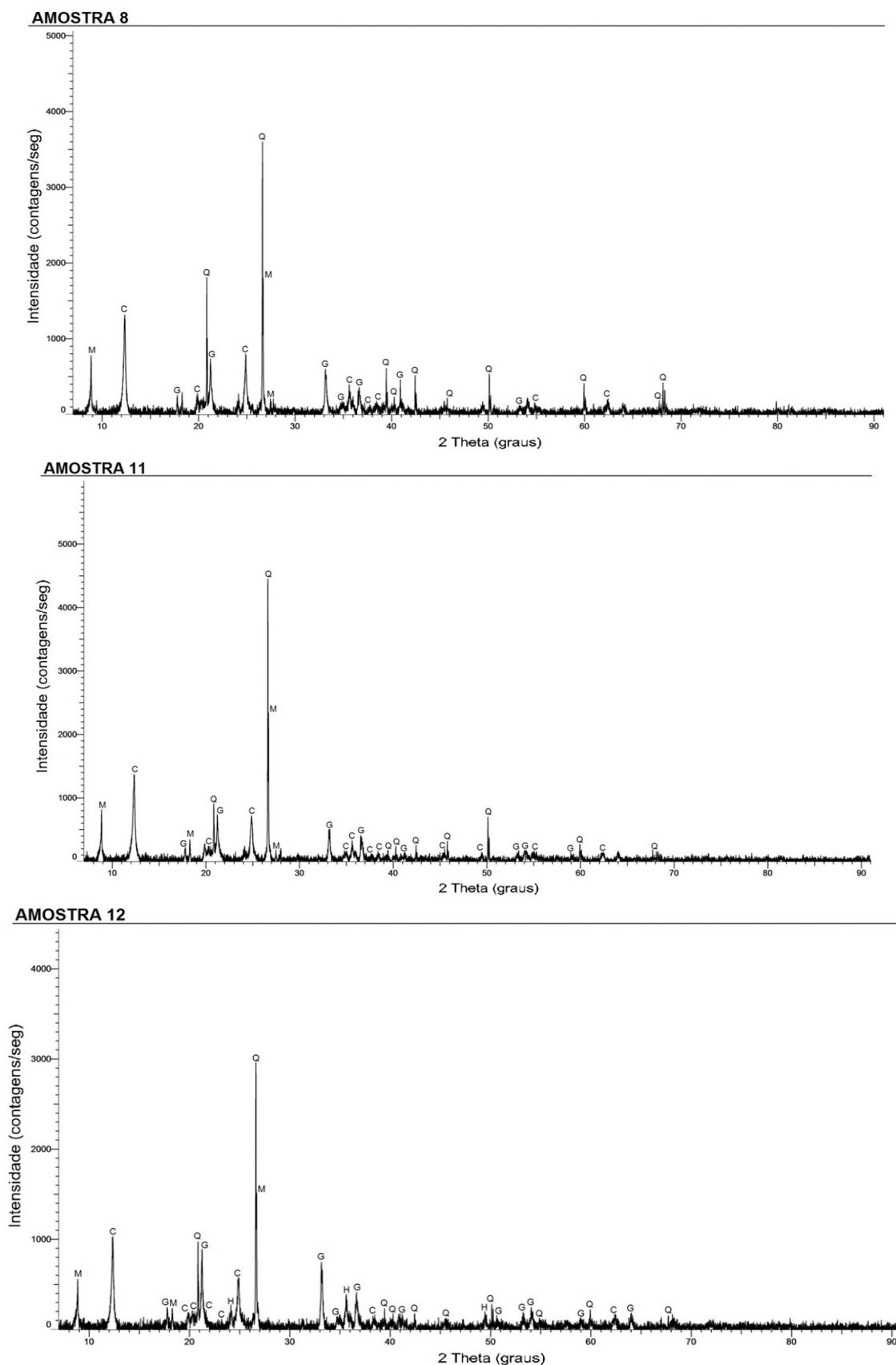


AMOSTRA 5



AMOSTRA 6





**Figura 8** - Difratomogramas gerados referentes a algumas amostras coletadas em campo, consideradas de extrema relevância para análise. Legenda: M (muscovita  $\text{KA}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ ), C (caulinita -  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), G (goethita -  $\text{FeO}(\text{OH})$ ), H (hematita -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Q (quartzo -  $\text{SiO}_2$ ). Fonte: Autores.

## **Caracterização mineralógica dos resíduos minerários dispostos no setor capixaba do rio Doce, após o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG**

### **CONCLUSÃO**

Os minerais encontrados nos difratogramas associam-se amplamente com a área de estudo, ainda que a lama minerária oriunda do desastre ambiental também tenha contribuído com um novo aporte mineral, evidenciada pelos picos de alta intensidade do quartzo encontrados, bem como a presença de minerais de ferro em todo o conjunto amostral analisado.

Entretanto, estes estudos preliminares devem corroborar avaliações futuras, devendo-se alertar que seja feito um monitoramento com análises mais criteriosas e detalhadas, levando-se em consideração parâmetros físicos e químicos, não abordados nessa pesquisa, mas que são de importância para atestar a qualidade dos sedimentos como, por exemplo, a análise de elementos-traço por ICP. Também seria necessário um monitoramento sistemático por um período maior de tempo, vinculado às observações de campo, buscando possíveis fontes interferentes.

### **7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABREU NETO, J. C. de. **Análise textural e geoquímica dos argilominerais do talude continental do oeste do Ceará**. 2012. 77 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce - Rompimento da Barragem em Mariana/MG**. 2016. Disponível em: <[http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2016/03/EncarteRioDoce\\_21\\_03\\_2016\\_1.pdf](http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2016/03/EncarteRioDoce_21_03_2016_1.pdf)>. Acesso em: 19 ago. 2016.

ECOPLAN-LUME. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações Para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce – Volume I, Relatório Final**. IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2010. Disponível em: <[http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2014/10/PIRH\\_Doce\\_Volume\\_I.pdf](http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2014/10/PIRH_Doce_Volume_I.pdf)>. Acesso em: 11 ago. 2016.

FONSECA FILHO, H. D. da; LOPES, G. A. C. **Avanços em caracterização de amostras sólidas cristalinas através de difratometria de raios-x**. Estação Científica, Macapá, AP, v. 3, p. 31-45, 2013.

MARTINS, M. E. **Estudo da variação da dinâmica fluvial do Rio Doce, com uso de imagens do satélite Landsat 5**. 2013. 40 p. Trabalho de conclusão de curso (monografia) – Departamento de Geologia, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2013.

MONTICELI, J. P.; CACCIARI, P. P.; SUZUKI, S.; FUTAI, M. M. **Correlação entre índices físicos e análise petrográfica na determinação do grau de fraturamento de um gnaíse**. In: VI Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, Goiânia (GO), 2014.

SANTOS, P. dos; COSTA, A. C. S. da. **Difratometria de raios-X e análise térmica das frações granulométricas de caulins**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, PR, v. 34, p. 9-22, 2013.

SILVA, C. de L. e; COSTA, A. T. da; LANDA, G. G.; FONSECA, H. F. C.; SILVEIRA, A. **Evaluation of sediment contamination by trace elements and the zooplankton community analysis in area affected by gold exploration in Southeast (SE) of the Iron Quadrangle, Alto Rio Doce, (MG) Brazil.** Acta Limnologica Brasiliensia, Rio Claro, SP, v. 25, p. 150-157, 2013.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S .R. **Fundamentos de Química Analítica.** 8a ed., São Paulo: Thomson Learning, 2006.

SPOMBERG, S. **Uso de difratometria de raios-X na quantificação de ferrita e austenita em aços inoxidáveis duplex.** São Bernardo do Campo, 2010, 71f. Iniciação Científica. Engenharia Metalúrgica e de Materiais, FEI, 2010.



## Capítulo 4

### **Características físico-químicas e Ensaio SPT (Standard Penetration Test) em um depósito de resíduos de rochas ornamentais**

*Marcus Araújo Alves dos Santos<sup>1</sup>, Mirna Aparecida Neves<sup>2</sup>, Simone Pereira Taguchi<sup>3</sup>, Valerio Raymundo<sup>4</sup>*

## **INTRODUÇÃO**

A atividade minerária é importante geradora de resíduos, destacando-se dentre os processos produtivos do setor, o beneficiamento dos minérios, ou seja, o tratamento pós-extração visando ao seu aproveitamento. As rochas ornamentais, como todo bem mineral, passam pelo processo de beneficiamento, que transforma blocos rochosos em placas polidas para revestimento.

Os resíduos de rochas ornamentais, compostos pelo pó da rocha processada e pelos insumos utilizados, possuem várias possibilidades de utilização como matéria-prima em outros processos produtivos. Porém, o que se observa atualmente é seu descarte indiscriminado, sem qualquer tipo de triagem e geralmente em locais impróprios, sem os devidos procedimentos de proteção ambiental. Com o passar do tempo, os depósitos passam a compor passivos ambientais que trazem prejuízos, os quais poderiam ser evitados ou dirimidos caso os resíduos fossem utilizados ou armazenados de forma adequada.

Este trabalho foi realizado em um depósito de resíduos característico dos que são comumente encontrados nos parques de beneficiamento do Espírito Santo. Trata-se de um local onde os resíduos foram armazenados diretamente sobre o solo, no próprio parque de beneficiamento, sem as medidas preventivas determinadas pelo órgão ambiental. A empresa pretendia construir um galpão sobre o depósito, utilizando-o como material de aterramento para preencher um declive no terreno. Para isso, foram realizados ensaios de resistência de solo com sondagem à percussão (também conhecida como Standard Penetration Test – SPT), gerando as amostras e os dados utilizados neste trabalho. O nome da empresa foi omitido para manter sua privacidade. Além do teste de resistência, o material foi analisado em laboratório, para determinação de suas características físico-químicas.

A pesquisa compõe o trabalho de conclusão de curso do primeiro autor e resultados mais detalhados poderão ser consultados em artigo já submetido a uma revista científica. O objetivo geral foi realizar a caracterização dos resíduos finos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais armazenados em um tipo de depósito comumente encontrado no Estado do Espírito Santo, realizando a caracterização física, química e mineralógica dos resíduos, além da determinação da resistência física do depósito.

## **LOCALIZAÇÃO DA ÁREA**

<sup>1</sup> Engenheiro Químico, Universidade Federal do Espírito Santo – CCAE.

<sup>2</sup> Departamento de Geologia, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, Universidade Federal do Espírito Santo - Alegre, ES, Brasil.

<sup>3</sup> Departamento de engenharia Química – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – Seropédica, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> Agrônomo, Espírito Santo, Brasil.

## **Características físico-químicas e Ensaio SPT (Standard Penetration Test) em um depósito de resíduos de rochas ornamentais**

O depósito de resíduos estudado localiza-se no município de Cachoeiro de Itapemirim, no sul do Estado do Espírito Santo, região Sudeste do Brasil. Por questão de sigilo industrial e a pedido da empresa proprietária do passivo ambiental, detalhes da localização do depósito não poderá ser revelado. Contudo, é importante citar que o depósito em questão é representativo de centenas de outros depósitos de resíduos finos, provenientes da serragem de blocos e polimento de chapas de rochas ornamentais produzidas no Brasil para o mercado interno e para exportação.

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

No setor de rochas ornamentais, os materiais mais conhecidos são os mármore e granitos, no entanto, qualquer tipo litológico que seja utilizado em revestimento para colunas, paredes, pilares, pisos, ou ainda em arte escultural e utensílios, está inserido no conceito de rocha ornamental (REIS e SOUZA, 2003 apud TEIXEIRA; MELO; OLIVEIRA, 2012).

Um dos aspectos negativos envolvidos na produção de rochas ornamentais é a geração de resíduos durante a extração das rochas e no processo de beneficiamento. O beneficiamento dos blocos de rochas ornamentais ocorre em três etapas: o desdobramento ou serragem, polimento de chapas brutas e corte e acabamento das chapas polidas. De acordo com Lopes (2007), no Brasil existem cerca de 7000 empresas de beneficiamento de rochas ornamentais, que produzem anualmente cerca de 190.000 toneladas de resíduo.

A extração de rochas ornamentais é feita em pedreiras a céu aberto, utilizando-se fios helicoidais, abrasivos e jatos de água de elevada pressão. A rocha é retirada sob a forma de blocos, geralmente com as dimensões de 3,0 m x 1,8 m x 1,8 m, os quais são transportados até os locais de beneficiamento (BUZZI, 2008).

O beneficiamento ocorre em três etapas: o desdobramento ou serragem, polimento de chapas brutas e corte e acabamento das chapas polidas.

Para a serragem são utilizadas lâminas de aço, granalha metálica e cal com o intuito de converter o bloco de rocha em chapas com aproximadamente dois a três centímetros de espessura. Nesta etapa, utiliza-se a lama abrasiva que possui granalha de aço em sua composição, além de cal e água (BUZZI, 2008). Essa lama ou polpa de serragem tem a função de causar o atrito entre as lâminas de aço e o bloco, desmembrando-o em várias chapas ou placas brutas. Após a perda do poder abrasivo, devido principalmente à fragmentação da granalha, a lama é descartada transformando-se no rejeito do processo de beneficiamento.

Tal resíduo é denominado Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais - LBRO (CHIODI, 2004). O resíduo contém o pó da rocha serrada (que fica agregado à lama), granalha de ferro, cal e água quando oriundo de teares convencionais e, quando proveniente de teares com fios diamantados, contém, em sua maior parte, pó de rocha e água.

Após a etapa de desdobramento, inicia-se o processo de polimento das chapas brutas. O mesmo é realizado por meio de elementos abrasivos que retiram a parte mais grosseira da superfície da chapa deixando-a com brilho e a espessura desejada. O corte e acabamento das chapas polidas constitui a última etapa do beneficiamento, na qual são confeccionados os artefatos úteis oriundos de rochas ornamentais, como tampos de mesa, pias, bancadas e pisos. Em relação ao resíduo gerado, a quantidade proveniente desta etapa é muito pequena comparada as etapas supracitadas.

No âmbito do processo de beneficiamento dos blocos, a lama gerada merece atenção, pois a expressiva quantidade produzida de resíduos leva à dificuldade de acomodação dos mesmos. Esta falta de opção para lidar com os resíduos ocasiona a formação de inúmeros sítios de deposição, que em sua grande maioria, permanecem esquecidos e tomam espaço físico da indústria. Na esfera ambiental, a formação destes depósitos pode ser nociva ao meio ambiente, já que, em muitas vezes, os mesmos são clandestinos, ou seja, não são construídos



tomando-se as precauções necessárias, além de estar localizados em regiões ambientalmente sensíveis, como aquelas próximas de curso d'água e vertentes de alto declive.

Segundo Campos et al. (2009) um importante fator que contribui com a excessiva geração de resíduos é a falta de tecnologia relacionada ao assunto, uma vez que os métodos empregados são rudimentares. A maioria dos rejeitos são estocados de forma inadequada e deixados nas próprias pedreiras, o que gera potenciais de riscos a acidentes, prejudicando, inclusive, a logística dos trabalhos na própria empresa de extração, já que o local ocupado se torna indisponível para outras atividades.

O IEMA (Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos), por meio da Instrução Normativa 11/2016 (ESPÍRITO SANTO, 2016), regula os procedimentos para licenciamento da disposição de lama do beneficiamento de rochas ornamentais. A construção destes aterros é uma obra de engenharia destinada a confinar os resíduos em menor área e no menor volume possível, com todas as medidas necessárias para a proteção e monitoramento ambiental. Contudo, grande parte das disposições de resíduos existentes, principalmente as mais antigas, não segue tal normativa. Por este motivo, em lugar da denominação “aterro”, utiliza-se aqui o termo “depósito” para o sítio de disposição de resíduos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras foram coletadas por sondagem a trado manual em um depósito de resíduos finos da indústria de rochas ornamentais. Foram realizados seis (6) furos de sondagem a trado onde foram coletados cerca de 100 gramas de amostra a cada metro de profundidade.

A análise granulométrica dos resíduos e materiais do substrato foi realizada por meio de peneiramento manual em peneiras de aço inoxidável padrão ABNT. As amostras foram destorroadas com o auxílio de um pistilo de borracha visando à desagregação dos aglomerados formados pelas partículas finas presentes na amostra. As peneiras utilizadas foram as de 250, 115, 60 e 20 mesh acompanhadas do fundo coletor ou caixilho.

De acordo com Chagas (2001), o índice de acidez pode ser obtido para qualquer massa de amostra, desde que seja preparada uma mistura com 50% em peso do material a ser analisado e 50% de água destilada. Tal procedimento foi adotado neste trabalho. A mistura foi agitada por 30 minutos e, após esse tempo, o pH foi medido por meio de um pHmetro de bancada, devidamente calibrado. Como houve rápida decantação das partículas, o pH foi medido em dois momentos: logo após os 30 minutos de agitação da mistura com água destilada e após 30 minutos, com a mistura em repouso. Buscou-se verificar se houve modificação do pH neste intervalo de tempo.

As amostras para a análise por fluorescência de raios X foram preparadas por meio de prensagem do material pulverizado. Para isso foi utilizada uma prensa hidráulica que possibilita a formação de pastilhas compactas e homogêneas. O material foi colocado em formas de alumínio e seguindo-seo método de preparação de amostras (PERDONÁ, 2014) foi realizada a confecção das pastilhas. Quanto menor o tamanho de partícula mais eficiente é o processo de prensagem e melhor a distribuição dos constituintes da amostra ao longo da seção da pastilha (BRISOLA, 2009). Quando a amostra, mesmo estando na granulometria ideal, apresenta dificuldade em se manter prensada, utiliza-se materiais ligantes como ácido bórico, parafinas ou ceras, proporcionando a estrutura recomendada para a análise.

A análise por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) é um método qualitativo baseado na medida das intensidades (números de raios X detectados por unidade de tempo) dos raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra (NASCIMENTO FILHO, 1999). De modo resumido, a análise por FRX consiste de três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios X característicos

## Características físico-químicas e Ensaio SPT (Standard Penetration Test) em um depósito de resíduos de rochas ornamentais

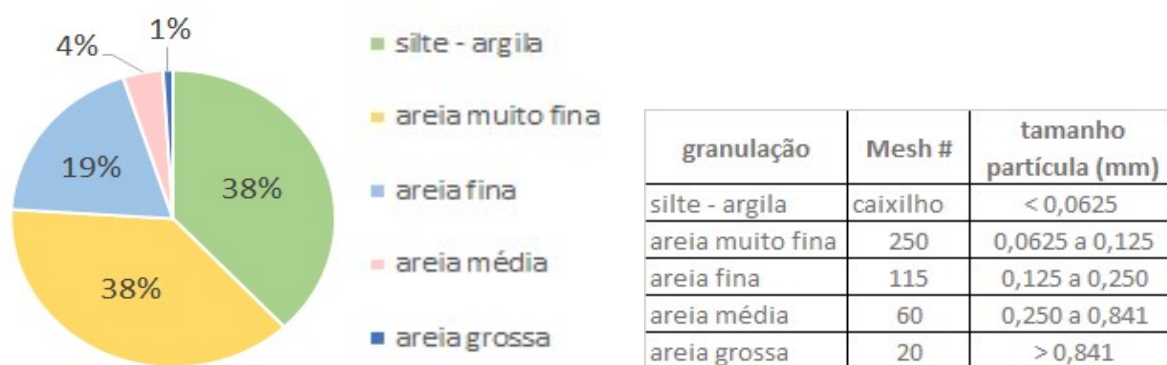
emitidos pela amostra e detecção dos raios X. Os raios X emitidos por tubos de um espectrofotômetro excitam os elementos da amostra que, por sua vez, emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra. Quando um elemento de uma amostra é excitado, ele tende a ejetar elétrons dos níveis mais internos do átomo, e como consequência disto, elétrons dos níveis mais afastados realizam um salto quântico para preencher a vacância. Cada transição eletrônica constitui uma perda de energia para o elétron e esta energia é emitida na forma de um fóton de raios X, com energia característica e bem definida para cada elemento. As análises por fluorescência de raios X foram realizadas no equipamento do Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia do CCENS/UFES. O funcionamento do equipamento é automatizado, bastando acoplar a(s) pastilha(s) no(s) porta amostra(s) e realizar os procedimentos conforme as orientações constantes no tutorial do software de análise do computador acoplado ao equipamento.

Uma alíquota de cada amostra foi reservada para análise mineralógica por difratometria de raios X (DRX), utilizando radiação  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) no intervalo angular  $2\theta = 4-90^\circ$ , passo angular  $0,02^\circ$  e contagem de 2 segundos. A identificação das fases cristalinas foi feita por meio de fichas JCPDS da International Center for Diffraction Data.

O ensaio de resistência física foi realizado in situ nos seis furos de sondagem, que atravessaram todo o depósito de resíduos e adentraram alguns metros no substrato geológico. A determinação da resistência à penetração foi feita a cada metro de profundidade, por meio do Standard Penetration Test (SPT), que envolve a contagem do número de golpes necessários para cravação de 30 cm de um amostrador-padrão, conforme os procedimentos da NBR 6484 (ABNT, 2001).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição granulométrica dos resíduos estudados (Figura 1) mostra que o material é composto por grãos de tamanho: areia grossa (1%), areia média (4%), areia fina (19%), areia muito fina (38%) e material recolhido no caixilho (38%), correspondente às frações silte e argila. Portanto, os resíduos possuem granulação predominantemente muito fina, compostos em 76% por grãos menores do que  $0,125 \text{ mm}$ .



**Figura 1** - Granulometria dos resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais coletados no depósito de uma indústria (Mesh # corresponde à numeração da peneira utilizada – ABNT e o tamanho, em mm, é o range de partículas retidas em cada peneira). Fonte: Autores.

O potencial hidrogeniônico (pH) foi aferido em laboratório logo em seguida à mistura do resíduo com água destilada e após transcorridos 30 minutos (Tabela 1). Os valores de pH obtidos no primeiro momento tendem a ser mais elevados, situando-se entre a faixa de 8,52 a

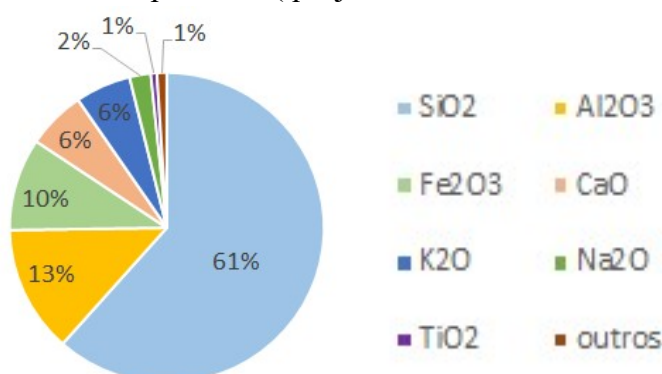
10,8 (excluindo os outliers). As medidas após 30 minutos, indicam valores menores de pH, entre o mínimo de 6,15 e máximo de 10,42, com média de  $9,23 \pm 1,43$ .

**Tabela 1** - Valores referentes ao pH do resíduo coletado no depósito de resíduos. Fonte: Autores.

AMOSTRA	N**	média	desvio padrão	mediana	valor mínimo	valor máximo
Resíduo	27	10,28	0,53	10,41	8,52	10,80
Resíduo 30 *	27	9,23	1,43	10,07	6,15	10,42

\* Segunda medida, após 30 minutos; \*\* Número de amostras analisadas.

Com relação à composição química, o constituinte principal do resíduo é a sílica ( $\text{SiO}_2$ , com  $59,31 \pm 5,4\%$ ), seguida pelo  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $16,6 \pm 6,36\%$ ) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $10,45 \pm 3,87\%$ ). O  $\text{K}_2\text{O}$  e o  $\text{CaO}$  ocorrem em porcentagens semelhantes (perto de 5%), sendo seguidos pelo  $\text{Na}_2\text{O}$  (1,68%) e pelos demais componentes (que juntos somam menos de 2%) (Figura 2).



**Figura 2** - Composição química relativa (%) dos constituintes principais do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais coletado no depósito estudado. Fonte: Autores.

A distribuição destes elementos no depósito é heterogênea, com exceção da sílica, que, além de ser sempre abundante, não apresenta grandes variações (Figura 3). Os demais elementos ocorrem em quantidades muito variáveis entre os furos, o que se deve à dependência da composição do resíduo e a rocha serrada, sendo a disposição dos resíduos no depósito feita de maneira aleatória. Desta forma, o uso destes materiais em produtos que dependam de algum controle composicional só poderá ser feito se houver separação dos resíduos ao serem gerados.

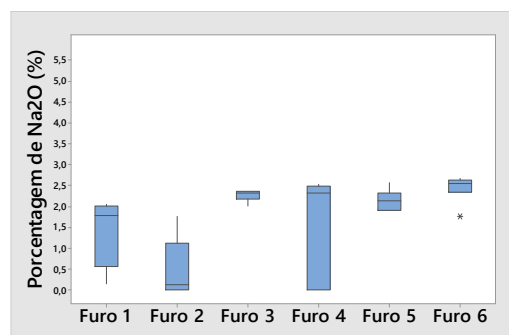
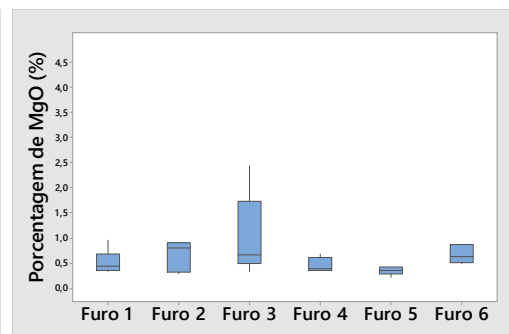
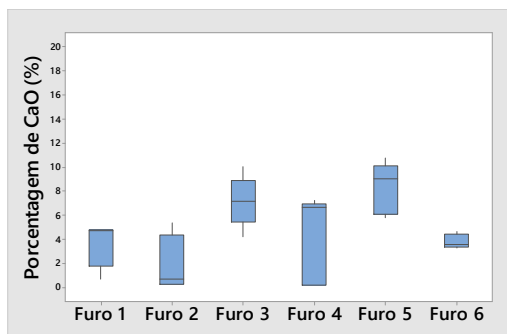
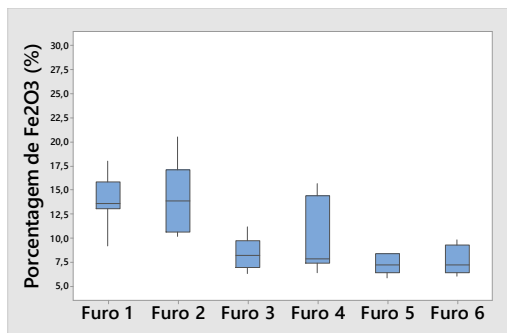
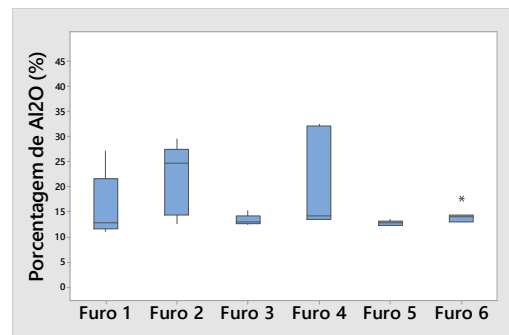
Foram analisadas 42 amostras por DRX, referentes ao resíduo coletado no depósito e em seu substrato. A partir destas análises, foram selecionados três difratogramas considerados como representativos dos materiais encontrados. Foram detectados picos característicos dos seguintes minerais: Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), Plagioclásio ( $((\text{Ca},\text{Na})\text{Al}(\text{Al},\text{Si})\text{Si}_2\text{O}_8)$ ), Microclina ( $\text{KAlSi}_2\text{O}_8$ ), Calcita ( $((\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3)$ ), Caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) e Piroxênio ( $((\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_6)$ ), os quais foram identificados de acordo com as características específicas de cada fase cristalina (Figura 4).

Os minerais presentes no resíduo são oriundos da rocha serrada (pó de rocha) que foi incorporada à lama abrasiva. São silicatos comumente encontrados nas rochas ígneas e metamórficas que são utilizadas como rochas ornamentais (quartzo, microclina e plagioclásio), enquanto a calcita corresponde aos mármore.

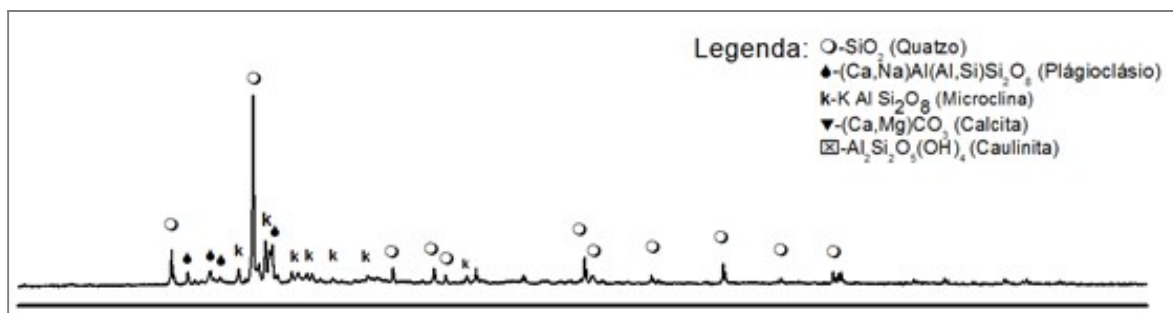
Com o intuito de se analisar a possibilidade de utilização do terreno ocupado pelos resíduos de rochas ornamentais, foi realizado, pela empresa que forneceu as amostras, um teste de resistência física no local. Dos seis ensaios realizados, foi selecionado aquele apresentado na Figura 5 para ilustrar os resultados obtidos.

## Características físico-químicas e Ensaio SPT (Standard Penetretion Test) em um depósito de resíduos de rochas ornamentais

Em alguns ensaios foi identificada uma camada de resíduo pouco compacto, o que configura um material de baixa resistência. Neste caso, não é recomendável a utilização de uma fundação rasa (do tipo sapata ou bloco), mas fundações profundas, como, por exemplo, estaca ou tubulão. Em outros locais do depósito, identificou-se camadas que viabilizam a utilização de fundações rasas. O nível de maior resistência deve ser relativo ao acúmulo de granalha de aço, que após oxidação, compõe crostas lateríticas compactas. É importante ressaltar que a heterogeneidade do depósito e a tendência de acúmulo de humidade devido à fina granulação do resíduo são fatores que limitam inferências que sejam válidas para o depósito como um todo. Desta forma, a recomendação mais segura é o uso do substrato geológico abaixo do depósito para a instalação de fundações. Neste caso, o depósito seria apenas um material de preenchimento do aterro.

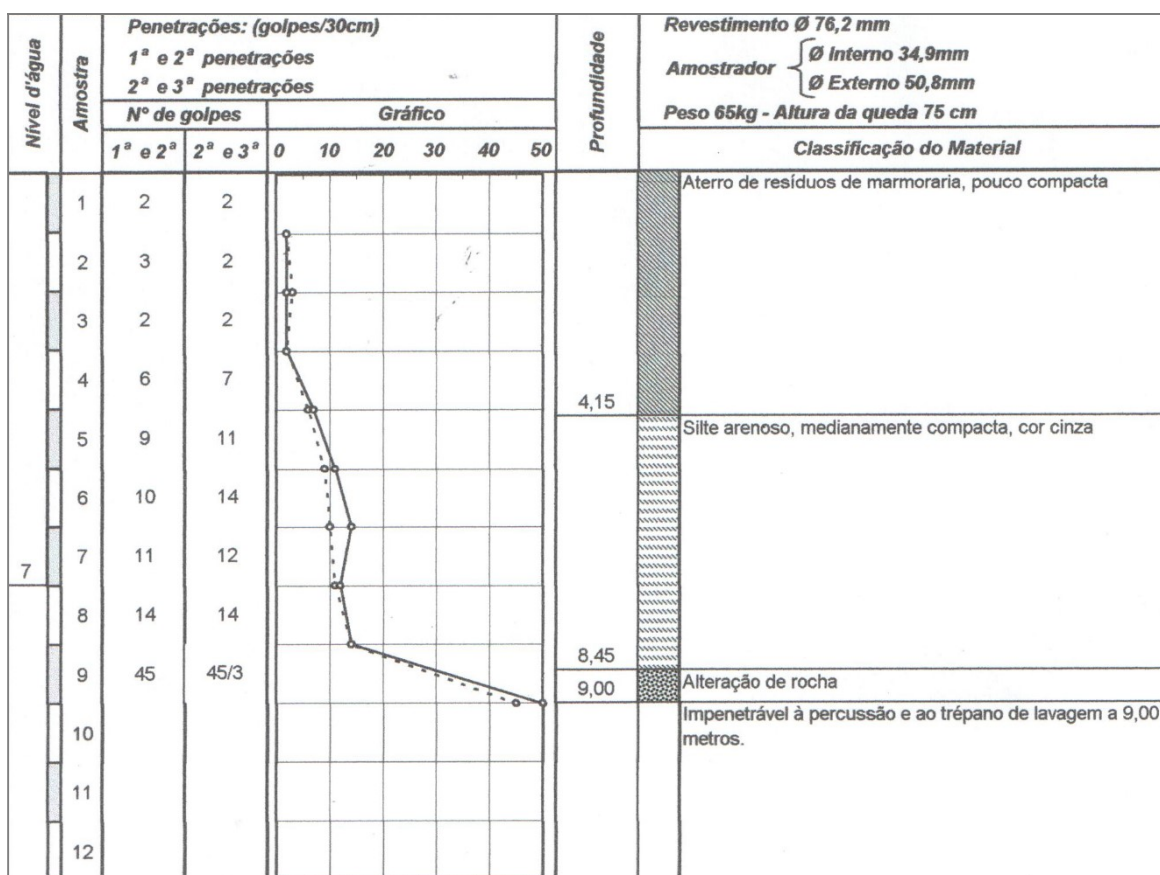


**Figura 3** Variabilidade da composição química nos furos de sondagem localizados no depósito de resíduos. Fonte: Autores.



**Figura 4** - Difratograma representativo das 42 amostras de resíduos analisadas.

Fonte: Autores.



**Figura 5** - Perfil ilustrativo dos resultados dos ensaios de resistência do material (sondagem SPT) no sítio de deposição de resíduos. O “impenetrável à percussão”, isto é, o material capaz de suportar uma fundação ocorre no nível de alteração de rocha (profundidade em metros).

Fonte: Autores.

## CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo caracterizar resíduos finos de rochas ornamentais armazenados em um depósito característico das indústrias deste setor e estudar a resistência física do depósito, visando à reutilização do grande espaço até então ocupado.

Com relação às características granulométricas, os resíduos possuem granulação muito fina, sendo 76% dos grãos de tamanho areia muito fina, silte e argila (passante na peneira de

## **Características físico-químicas e Ensaio SPT (Standard Penetration Test) em um depósito de resíduos de rochas ornamentais**

Mesh 250). O pH do resíduo varia entre 8,2 e 10,5. Na composição química dos resíduos predomina o Óxido de Silício ( $\text{SiO}_2$ ), Óxido de Alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e Óxido de Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Em porcentagens menores ocorrem ainda Óxido de Cálcio ( $\text{CaO}$ ), Óxido de Sódio ( $\text{NaO}$ ) e Óxido de Potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) sendo que os demais compostos somam menos de 3%.

Estes elementos compõem fases cristalinas correspondentes aos minerais: Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), Plagioclásio ( $((\text{Ca},\text{Na})\text{Al}(\text{Al},\text{Si})\text{Si}_2\text{O}_8)$ ), Microclina ( $\text{KAlSi}_2\text{O}_8$ ), Calcita ( $((\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3)$ ), Caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) e Piroxênio ( $((\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_6)$ ).

A partir do teste de resistência física realizado no sítio de deposição, conclui-se que as camadas de resíduo são pouco compactas para receber fundações rasas (do tipo sapata ou bloco), sendo necessário, portanto, a compactação do terreno ou a utilização de fundações profundas, como por exemplo, estaca ou tubulão apoiadas no substrato abaixo do depósito.

## **7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - método de ensaio**. ABNT/CB-02 - Comitê Brasileiro de Construção Civil. Rio de Janeiro, 2001.

BRISOLA, D. F. **Otimização no preparo de amostras para análise em espectrofotômetro de fluorescência de raios X**. Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

BUZZI, D. C. **Estudo de classificação e quantificação das lamas geradas no processo de beneficiamento de rochas ornamentais**. 2008. 365 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória ES, 2008.

ESPÍRITO SANTO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HIDRICOS. **Instrução Normativa nº 11 de 11 de Outubro de 2016**. SEAMA/IEMA, Vitória (ES), 2016. Disponível em: <<http://www.meioambiente.es.gov.br/>> Acesso em 04 de maio de 2017.

CAMPOS, A. R.; CASTRO, N. F.; VIDAL, F. W. H.; BORLINI, M. C. **Tratamento e aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais e de revestimento, visando mitigação de impacto ambiental**. In: XXIII SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE VII SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 2009, Fortaleza. Anais... Fortaleza, 2009.

CHAGAS, A. P. **Como se faz Química**. (Com introdução de Etelvino Bechara). Editora Unicamp. 2001.

CHIODI, C. F. **Consumo interno, perfil de utilização e estrutura de comercialização das rochas ornamentais e de revestimento no Brasil**. Publicação técnica. ABIROCHAS. Minas Gerais, 2004.

LOPES, J. L. M. **Influência da utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como filler, nas propriedades do concreto**. 2007. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) –Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

NASCIMENTO FILHO, V. F. **Técnicas analíticas de fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF)**. Departamento de Ciências Exatas/ESALQ, USP, SP. Julho, 1999.

PERDONÁ, C. R. **Preparação de amostras para Espectrometria de Fluorescência de raios X**. Bruker do Brasil. São Paulo, 2014.

TEIXEIRA, A. F. N.; MELO, L. B.; OLIVEIRA, N. S. M.; **Rochas ornamentais: o desenvolvimento econômico e suas relações com a sociedade brasileira e nordestino**. Congresso Norte Nordeste de Pesquisas e Inovação 19. Anais..., n. VI, Palmas (TO), 2012.





## Capítulo 5

### Caracterização geoquímica das principais rochas ornamentais beneficiadas no Espírito Santo

*Mary Ester Santiago Machado<sup>1</sup>, Tamires Costa Velasco<sup>1</sup>, Rodson de Abreu Marques<sup>1</sup>, Mirna Aparecida Neves<sup>1</sup>*

## INTRODUÇÃO

As rochas estudadas são procedentes dos estados da Bahia, de Minas Gerais e do Espírito Santo, onde são transformadas em chapas e destinadas ao mercado interno e à exportação.

O presente trabalho consiste na apresentação dos resultados das análises químicas das rochas ornamentais mais comercializadas no município de Cachoeiro de Itapemirim, sul do estado do Espírito Santo. Tentando-se retirar o máximo de informações possíveis de modo que seja útil tanto para o meio acadêmico, considerando que poucos são os dados e estudos referentes ao mercado de rochas ornamentais, para a sociedade e comerciantes, sugerindo o melhor meio de aplicação dos diferentes tipos de rochas de acordo com suas características composicionais, minimizando-se assim problemas de alterações das características da rocha após a aplicação final do material como revestimento em paredes, pisos e outras.

O estudo de classificação litológica e composicional foi baseado na análise geoquímica dos litotipos.

O mercado de rochas ornamentais causa uma forte influência na economia local e no estado do Espírito Santo, pois o fato de Cachoeiro de Itapemirim ser o maior polo processador de rochas ornamentais da América Latina, faz com que gere renda e movimente mercados afins. Apesar dos impactos positivos na economia, esses empreendimentos resultam em danos ambientais, o que em relação ao meio acadêmico, é importante ressaltar as oportunidades para pesquisas científicas na área ambiental, como precauções em relação ao risco que os resíduos gerados em cada etapa do processo de beneficiamento desses materiais podem causar ao meio ambiente e do aproveitamento desses resíduos.

As informações levantadas também poderão contribuir com futuros estudos relativos à caracterização e classificação dos resíduos gerados durante o beneficiamento dessas rochas. Além disso, visam complementar estudos petrográficos já realizados com esses litotipos como em Machado (2012) e Marques et al. (2017).

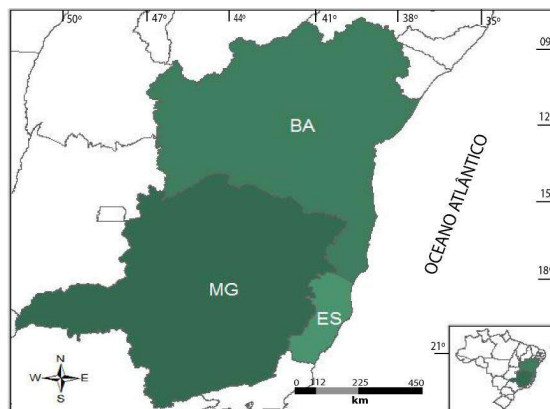
O trabalho propôs o estudo de rochas ornamentais beneficiadas na região de Cachoeiro de Itapemirim, sendo escolhidos, para amostragem, os blocos mais usualmente comercializados e/ou diferenciados.

## LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

As rochas estudadas nesse trabalho têm procedência de três estados brasileiros (Figura 1), sendo dois da região sudeste, Espírito Santo e Minas Gerais e outro da região nordeste, Bahia. As amostras foram fornecidas por empresas de beneficiamento do município de Cachoeiro de Itapemirim-ES.

<sup>1</sup> Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo, CCENS, Alegre, ES

## Caracterização geoquímica das principais rochas ornamentais beneficiadas no Espírito Santo



**Figura 1** - Mapa de localização dos estados procedentes das amostras em estudo, Bahia (BA), Minas Gerais (MG) e Espírito Santo (ES). Sistemas de coordenadas geográficas e datum SAD 69. Fonte: Autores.

Na Bahia os principais municípios que comercializam seus blocos para serem beneficiados em Cachoeiro de Itapemirim são Cândido Sales, Medina e Medeiros Neto. Em Minas Gerais, os municípios restringem-se a Mutum e Salinas.

A maioria das amostras beneficiadas em Cachoeiro de Itapemirim provém de variadas regiões do Espírito Santo (Figura 2). São representadas principalmente pelos municípios de Água Doce do Norte (1), Barra de São Francisco (2), Pancas (3), Colatina (4), São Roque do Canaã (5), Aracruz (6), Afonso Cláudio (7), Venda Nova do Imigrante (8), Castelo (9), Iconha (10) e Rio Novo do Sul (11). Estes são os principais municípios responsáveis pela movimentação do comércio de rocha ornamental no estado do ES.

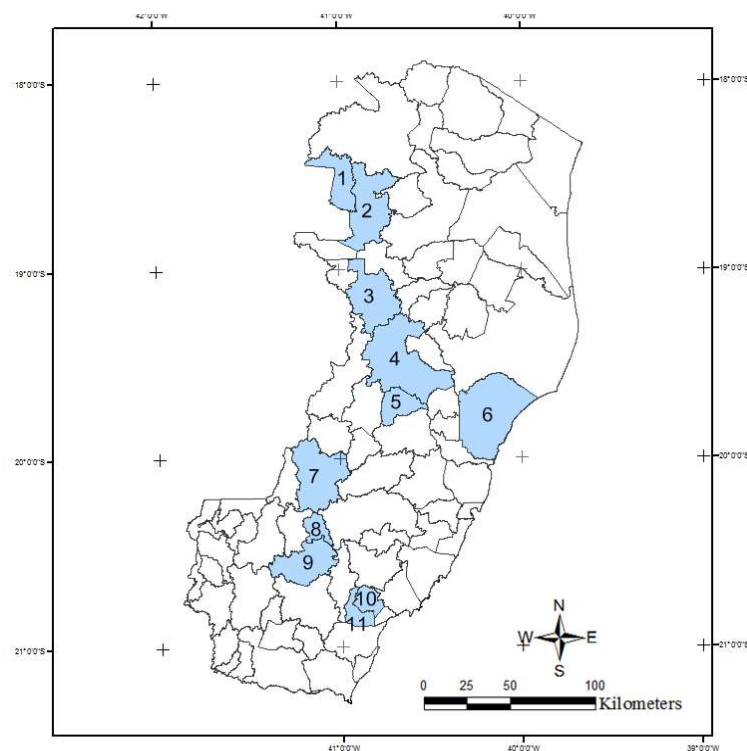
### GEOLOGIA REGIONAL

As rochas estudadas estão no contexto do Cráton São Francisco e da Faixa Móvel Araçuaí. A porção meridional do Cráton do São Francisco é circundada por duas províncias estruturais desenvolvidas durante o ciclo Brasileiro (ALMEIDA, 1977): a Província Tocantins e a Província Mantiqueira (HEILBRON et al., 2004a, b; SILVA et al., 2005), da qual faz parte a Faixa Araçuaí, identificada na Figura 3.

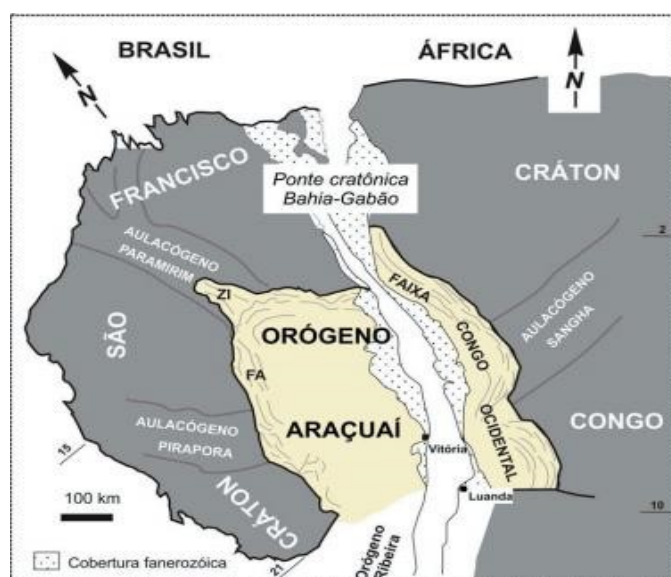
A geologia regional do Espírito Santo está contida no contexto da Província Mantiqueira, em grande parte no Cinturão Móvel Araçuaí (ALMEIDA, 1977; PEDROSA-SOARES et al., 1998, 2001; ALKMIN et al., 2001, 2003; WIEDEMANN et al., 2002). Do ponto de vista litoestratigráfico, constitui o arcabouço litológico regional, onde ocorrem as rochas metamórficas de alto grau dos Complexos Paraíba do sul e Nova Venécia de idades arqueanas a paleoproterozóicas (2100-1500 Ma) representam o embasamento cristalino com protólitos para e ortoderivados (NOCE et al., 2007).

O estágio colisional principal do orógeno Araçuaí, na região centro-sul do Espírito Santo durou de 604 +/- 27 Ma (Sm-Nd de FISCHER et al., 1998) a 580 Ma +/- 13 Ma (U-Pb em zircões de SÖLLNER et al., 2000). Durante esse episódio tectônico houve aumento progressivo do metamorfismo, que atingiu a fácies anfibolito alto a granulito. De acordo com PEDROSA-SOARES et al., (2000) as suítes magmáticas G1 e G2 são relacionadas ao estágio pré-colisional do Orógeno, sendo que a G1 é composta por tonalito e granodiorito gnaissificados, 595-585 Ma e G2 por granitos tipo S gnaissificados, 585-560 Ma. Duas suítes magmáticas contemporâneas, porém distintas, G3 (do tipo S) e G3 (do tipo I), com granitos

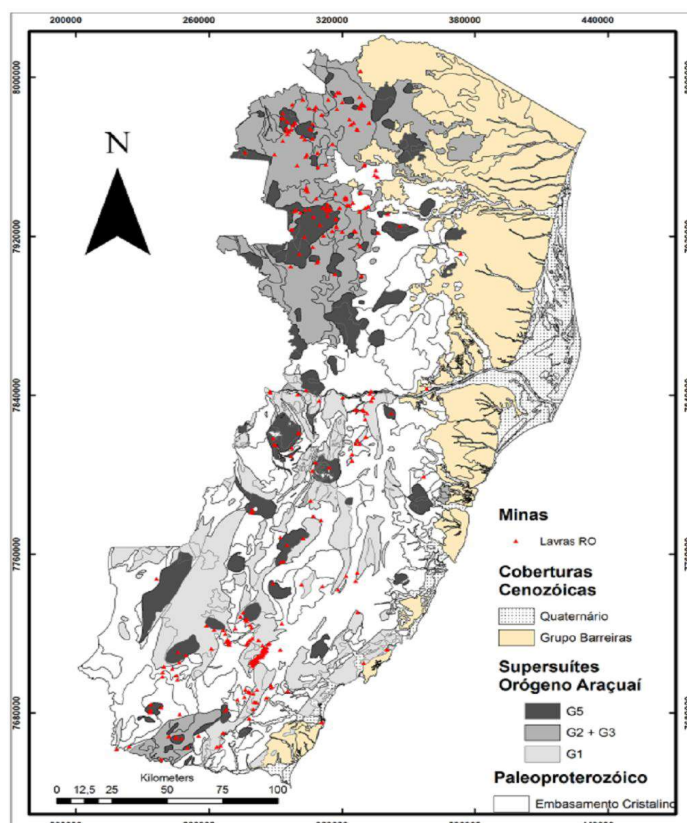
tipo I, associado ao estágio tardi a pós-colisional (PEDROSA-SOARES et al., 1999b). As suítes G4 e G5 são referentes ao estágio final do colapso do Orógeno, sendo essas constituídas por leucogranitos tipo S, 520-500 Ma e por granitos tipo I, 520-500 Ma, respectivamente. As suítes magmáticas do Espírito Santo estão melhor identificadas na figura 4 (VETORAZZI, 2012).



**Figura 2** - Mapa de localização dos municípios do ES, destacados em azul, que fornecem blocos para serem beneficiados em Cachoeiro de Itapemirim. Sistema de coordenadas geográficas Datum Sad 69. Fonte: Autores.



**Figura 3** - O Orógeno Araçuai na região central do Paleocontinente Gondwana. Fonte: ALKMIM et al. (2006).



**Figura 4** - Mapa esquemático mostrando as unidades estratigráficas do estado do Espírito Santo e lavras de rochas ornamentais. Fonte: Vetorazzi (2012).

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na pesquisa bibliográfica será visto alguns conceitos e termos relacionados as rochas ornamentais, tanto do mercado, quanto do meio acadêmico, considerando que o público alvo se estende a sociedade, que normalmente não é familiarizada com estes termos.

## ROCHAS ORNAMENTAIS

A classificação de rochas ornamentais é dada por diversos autores e pesquisadores da área, de acordo com suas características físicas, cor, resistência, grau de polimento (procedimento realizado com intuito de reativar ou gerar brilho em alguma superfície), brilho, grau de alteração, entre outros atributos.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1995), rocha ornamental é definida como uma substância rochosa natural que, submetida a diferentes graus de modelamento ou beneficiamento, pode ser utilizada com uma função estética qualquer.

Vargas et al., (2001), diz que a característica principal de uma rocha ornamental é firmeza física, sendo o alto brilho da superfície polida também de extrema importância. Quando a mesma não se encontra polida é chamada de “rocha semi-ornamental”. Seus principais campos de aplicação incluem tanto peças isoladas, como esculturas, tampos e pés de mesa, balcões, lápides e arte funerária em geral, quanto edificações, destacando-se, nesse caso, os revestimentos internos e externos de paredes, pisos, pilares, colunas, soleiras, etc. (ABIROCHAS/CETEM, 2001).

Menezes e Larizzatti (2005) consideram que qualquer rocha com possibilidade de extração como bloco e de desdobramentos em chapas, com ou sem beneficiamento, pode ser

considerada potencialmente uma rocha ornamental ou de revestimento.

Comercialmente, as rochas ornamentais e semi-ornamentais são basicamente classificadas de acordo com a sua composição geral. As que possuem calcita/dolomita são classificadas como mármore e as compostas basicamente por quartzo e feldspato são classificadas como granitos (alto teor de sílica – SiO<sub>2</sub>). Tais classes de rochas ornamentais são consideradas economicamente mais importantes, pois respondem por 90% da produção mundial. Os demais tipos são as ardósias, quartzitos, pedra sabão, serpentinitos, basaltos e conglomerados naturais (PEITER et al., 2001). No Brasil os basaltos são mais comuns no Rio Grande do Sul.

## CLASSE GRANÍTICA

A classe “granítica”, em termos de classificação comercial de rocha ornamental, envolve não só rochas de composição granítica, mas também rochas alcalinas e gnaisses de protólitos sedimentares e ígneos.

Os “granitos” são as rochas mais resistentes, não perdendo o brilho de polimento durante longos anos. Os coloridos são muito procurados no mercado. Correspondem cientificamente às rochas ígneas e metamórficas de granulometria grossa compostas principalmente de minerais félsicos, tais como quartzo, feldspato alcalino e plagioclásio (VARGAS et al., 2001) com dureza entre 6 e 7 na escala de Mohs. Abrange, neste sentido, uma variada gama de tipos textural, estrutural e composicionalmente distintos, o que reflete em cores e padrões estéticos diversos (MENEZES e LARIZZATTI, 2005).

## CLASSIFICAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS SEGUNDO A COR

O uso das rochas ornamentais no Brasil é muito grande, sobretudo, as rochas de coloração vermelha, rosa, amarela, verde e azul, chamadas popularmente de “rochas coloridas”, tão abundantes em quantidade quanto em variedades (VARGAS et al., 2001).

Segundo Moraes et al., (2008), a coloração de uma rocha é o principal atributo para qualificação na sua utilização como material para revestimento. A presença de fraturas e/ou fissuras (porosidade), tipo litológico (mineralogia, alteração, textura e estrutura) e o clima (temperatura e intensidade das chuvas) são fortes fatores que influenciam na taxa de intemperismo químico e físico (FRASCÁ, 2002).

Pelo ABIROCHAS/CETEM (2001), de acordo com o padrão cromático, os materiais rochosos podem ser classificados como clássicos, comuns ou excepcionais. Os clássicos não sofrem influência de modismo (incluem mármore vermelhos, brancos, amarelos e negros e granitos negros e vermelhos). Os materiais comuns são de grande uso nos revestimentos (incluem mármore beges e acinzentados e granitos acinzentados, rosados e amarronzados).

Os excepcionais normalmente são utilizados para peças isoladas e pequenos revestimentos (mármore azuis, violetas e verdes e granitos azuis, amarelos, multicores e brancos).

A rocha pode sofrer alterações na cor e deslocamentos, devido à sua exposição ao calor excessivo e às chuvas, ou podem ser naturalmente danificadas. Um exemplo comum é o que acontece quando os mármore são usados para revestimento, principalmente em áreas externas, onde a exposição à água causa dissolução do cálcio presente em sua constituição. Por meio de características tecnológicas, foi constatado que granitos amarelados são mais frágeis (MORAES et al., 2008).



## **METODOLOGIA**

Para atingir os objetivos propostos, o trabalho se desenvolveu ao longo de 4 etapas, descritas a seguir:

O estudo bibliográfico foi baseado em assuntos relativos às rochas ornamentais, com ênfase na classificação segundo o mercado de exportação e importação. Além disso, diversos trabalhos serviram de base para realização do estudo de geologia regional e aspectos petrográficos.

Na etapa de campo para coleta das amostras a serem estudadas foram visitadas diversas empresas de beneficiamento de rochas ornamentais na cidade de Cachoeiro de Itapemirim-ES, dentre elas Cajugram, Jaciguá, Fortpedras, Gramil, Gramazini, Nacional Pedras, M3C, Decolores e Stargran.

As 28 amostras de rochas escolhidas para análise química de pó total foram moídas no Laboratório de Preparação de Amostras do Departamento de Geologia do CCENS/UFES, utilizando-se um moinho do tipo panela e, posteriormente, o pó foi colocado em um recipiente específico para cada amostra e lacrado. Foi separada uma alíquota de, aproximadamente, 120 gramas para cada amostra e cada uma delas foi colocada em sacos plásticos devidamente identificados para serem enviados para a análise química de óxidos totais por Fluorescência de Raios X no laboratório Geosol. Os dados de descrição petrográfica macroscópica dessas amostras de rochas foram extraídos de Machado (2012).

Os dados da análise química do pó total da rocha, disponibilizados sob a forma de óxidos, foram tratados no software GCD-kit® 2.3, onde foram gerados os seguintes diagramas: Middlemost (1985), utilizado para a classificação geoquímica dos granitóides; e AFM, para a classificação de série toleítica ou cálcioalcalina e QAP (STRECKEISEN, 1974), para nomenclatura das rochas ígneas. Os gráficos foram tratados no Adobe Illustrator® 10.

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

No mercado de rochas ornamentais, a cor e a textura das rochas são os principais critérios para a classificação comercial. Porém, muitas vezes, essa classificação é feita de forma equivocada e em desacordo com a caracterização científica, gerando situações onde duas rochas com características petrológicas distintas podem receber o mesmo nome comercial.

Com base nas características de cor e/ou estrutura, Machado (2012) separa as rochas estudadas em cinco grupos: o Grupo 1 corresponde às amostras de coloração amarela; o Grupo 2, corresponde às amostras de coloração branca e cinza; o Grupo 3, às amostras verdes e pretas portadores de hiperstênio; o Grupo 4, às amostras que não possuem coloração bem definida pela variação de cores dos cristais (se encaixam as amostras de cor rosada, avermelhada, esverdeada e acastanhada); e o Grupo 5 corresponde às amostras classificadas petrologicamente como metamórficas, condizentes aos gnaisses, não havendo distinção por cores.

## **DESCRIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS**

O quadro 1, apresenta a descrição das amostras com um resumo referente à classificação, textura, mineralogia essencial, acessória e secundária de todas as amostras estudadas. Na Figura 5, observa-se a distribuição das amostras no Diagrama QAP para rochas Plutônicas (STRECKEISEN, 1974), onde o índice próximo ao símbolo corresponde à amostra em questão (ex.: 1 diz respeito à amostra RS-01).

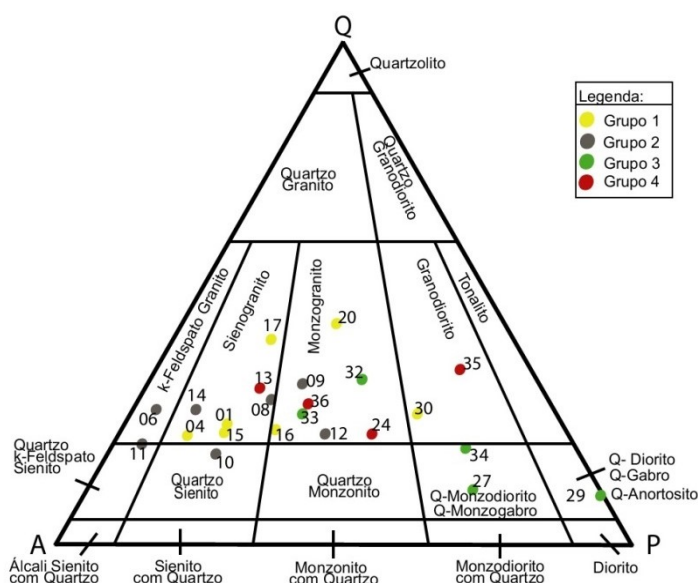
**Quadro 1** - Quadro resumo com classificação, textura e mineralogia constituinte das amostras. Fonte: Autores.

	Código	Classificação	Textura	Mineralogia essencial, acessória e secundária
GRUPO 1 (Ígnea)	RS-30	Granodiorito (diatexito)	Inequigranular Porfírica	K-feld, Plg, Qtz, Musc, Ser, Bt
	RS-16	Monzogranito	Porfírica Grossa	Qtz, K-feld, Plg, Bt, Musc, Ser, Clo, Zr, Apt, Opc
	RS-20	Monzogranito (diatexito)	Inequigranular	Qtz, Plg, K-feld, Ser, Bt, Musc, Carb
	RS-01	Sienogranito (diatexito)	Inequigranular	Qtz, K-feld, Plg, Grd, Opc, Bt, Ser
	RS-04	Sienogranito	Equigranular Porfírica	Qtz, Plg, K-feld, Bt, Musc, Opc, Apt, Ser, Zr
	Código	Classificação	Textura	Mineralogia essencial, acessória e secundária
	RS-15	Sienogranito	Inequigranular Bimodal	Qtz, K-feld, Plg, Bt, Hbl, Grd, Musc
	RS-17	Sienogranito	Inequigranular Porfírica	Qtz, Plg, K-feld, Bt, Opc, Zr, Ser
GRUPO 2 (Ígnea)	RS-06	Álcali Granito (diatexito)	Inequigranular Porfírica	Qtz, Plg, K-feld, Bt, Grd, Opc e Zr
	RS-11	Álcali Granito	Equigranular Bimodal	Qtz, Plg, K-feld, Bt, Musc, Opc, Apt, Esf, Zr, Clo, Ser
	RS-09	Monzogranito	Equigranular	Qtz, Plg, K-feld, Carb, Mus, Zr, Grd
	RS-12	Monzogranito	Inequigranular Porfírica	Qtz, K-feld, Plg, Bt, Carb, Musc, Esf, Zr, Opc, Apt, Epd
	RS-10	Quartzo Sienito (diatexito)	Equigranular	Qtz, Plg, K-feld, Grd, Opc, Zr, Bt
	RS-08	Sienogranito	Equigranular	Qtz, K-feld, Plg, Bt, Zr, Musc, Esf, Apt, Epd, Hbl, Clo
	RS-14	Sienogranito (diatexito)	Equigranular Bimodal	Qtz, K-feld, Plg, Bt, Grd, Apt, Sil, Opc, Zr
GRUPO 3 (Ígnea)	RS-29	Gabro	Inequigranular	Plg, Qtz, Cpx, Opx, Bt, Zr, Opc, Apt
	RS-32	Monzogranito	Inequigranular Porfírica	Qtz, Plg, K-feld, Apt, Bt, Cpx, Opc, Zr, Clo, Carb, Ser, Hbl, Esf, Esp
	RS-34	Quartzo Monzodiorito	Inequigranular	Qtz, Plg, K-feld, Hbl, Bt, Opx, Cpx, Apt, Zr, Opc
GRUPO 4 (Ígnea)	RS-35	Granodiorito	Inequigranular Porfírica	Qtz, Plg, K-feld, Bt, Carb, Apt, Zr
	RS-36	Monzogranito	Inequigranular Porfírica	Qtz, Plg, K-feld, Bt, Ser, Musc
	RS-24	Monzogranito	Equigranular	Qtz, Plg, K-feld, Bt, Hbl, Esf, Apt, Zr, Opc, Epd
	RS-13	Sienogranito	Inequigranular Bimodal	Qtz, Plg, K-feld, Bt, Opc, Zr, Musc

## Caracterização geoquímica das principais rochas ornamentais beneficiadas no Espírito Santo

GRUPO 5 (Metamórfica)	RS-02	Sil-esp-bt-grd gnaiss	Granoblástica Bimodal	Qtz, K-feld, Plg, Grd, Bt, Zr, Apt, Sil, Epd, Esp
	RS-03	Sil-bt-grd gnaiss	Porfiroblástica	Qtz, Plg, K-feld, Bt, Sil, Grd, Zr, Apt, Epd, Opc
	RS-25	Span-sil-grd-bt gnaiss	Porfiroblástica	Qtz, Plg, K-feld, Sil, Bt, Zr, Esp, Grd, Opc
	RS-07	Sil-grd-bt gnaiss antipertítico	Granolepidoblástica	Qtz, Plg, K-feld, Grd, Bt, Opc, Zr, Sil

Legenda: Qtz (Quartzo), K-feld (K-feldspato), Plg (Plagioclásio), Grd (Granda), Opc (Minerais opacos), Bt (Biotita), Ser (Sericita), Hbl (Hornblenda), Musc (Muscovita), Apt (Apatita), Zr (Zircão), Clo (Clorita), Carb (Carbonato), Esf (Esfeno), Epd (Epidoto), Cpx (Clinopiroxênio), Opx (Ortopiroxênio), Esp (Espinélio), Sil (Silimanita).



**Figura 5** - Diagrama QAP (STRECKEISEN, 1974) com classificação das amostras de rochas ígneas, baseada na estimativa modal visual, em função da variação de Quartzo (Q), Plagioclásio (P) e K-feldspato (A) das rochas.

### CARACTERIZAÇÃO DA QUÍMICA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS

Os dados de litogeoquímica foram obtidos a partir da análise química de óxidos totais por Fluorescência de Raios X de vinte e oito amostras e estão dispostos no Quadro 2. Pelos dados, observa-se que a maioria das amostras, com exceção das amostras 27 e 29, possuem um alto teor de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e K<sub>2</sub>O.

**Quadro 2** - Dados gerados da análise química das rochas. Fonte: Autores.

Amostra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T)	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO
RS-01	73,863	14,216	1,770	0,696	0,129	0,129	0,171	3,201	5,796	0,030
RS-02	75,364	13,063	2,482	0,985	0,332	0,281	0,188	2,844	4,441	0,020
RS-03	74,336	13,534	2,518	0,965	0,299	0,249	0,138	2,737	5,175	0,050



**CCENS****CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS ROCHOSOS**

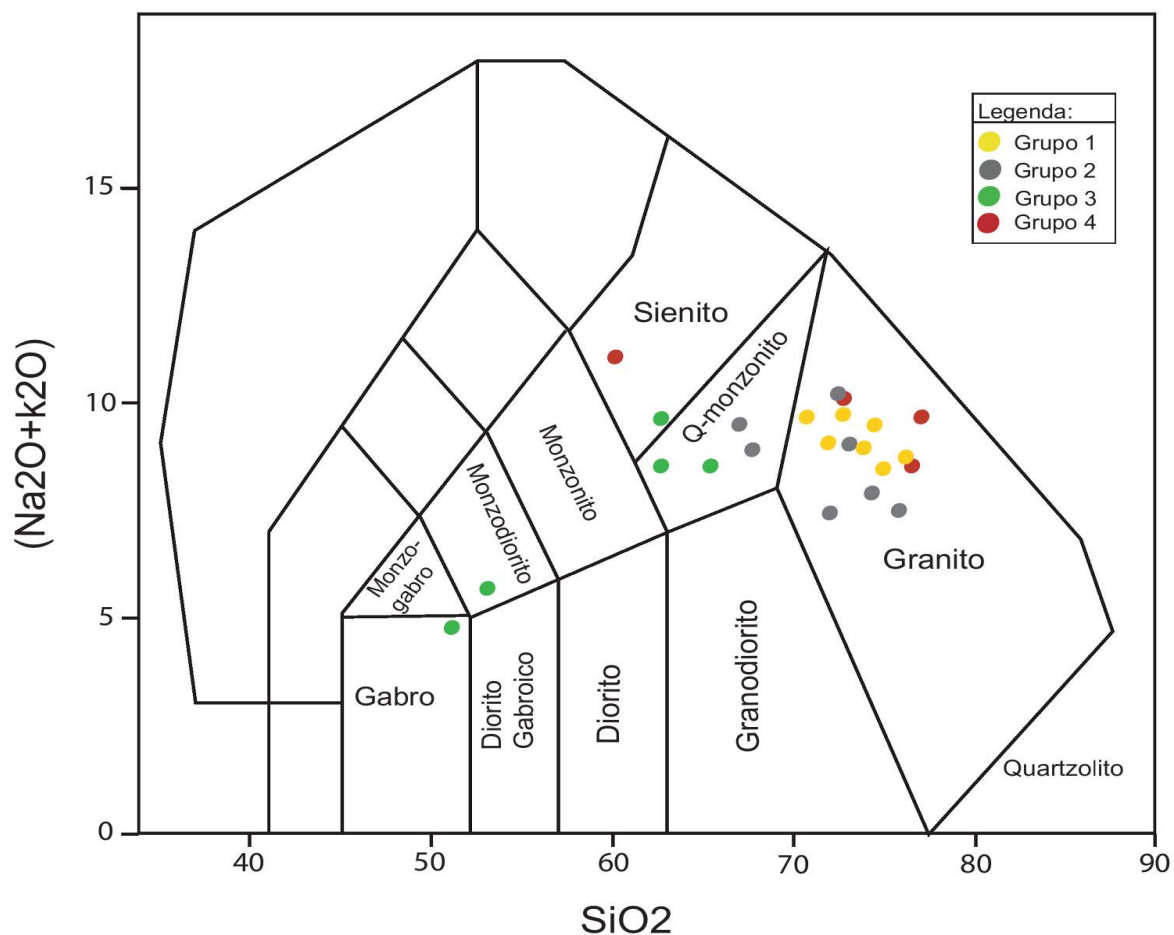
RS-04	70,630	14,665	2,484	1,397	0,489	0,469	0,171	2,903	6,774	0,020
RS-06	72,431	14,945	1,405	0,668	0,12	0,12	0,17	3,188	6,944	0,010
RS-07	66,683	6,068	6,980	1,336	2,792	1,085	0,126	2,320	2,511	0,100
RS-08	72,053	14,672	2,542	2,623	0,271	0,261	0,07	3,718	3,748	0,040
RS-09	75,877	13,704	0,867	1,854	0,101	0,03	0,059	3,537	3,960	0,010
RS-10	74,279	14,234	1,604	1,574	0,19	0,09	0,039	3,569	4,391	0,030
RS-11	67,092	15,645	3,841	2,016	0,832	0,822	0,225	3,871	5,636	0,020
RS-12	67,862	14,599	4,430	2,275	0,805	0,795	0,281	3,302	5,598	0,050
RS-13	77,144	11,915	0,868	0,263	0,101	0,04	0,015	2,262	7,381	0,010
RS-14	73,205	14,058	2,199	0,884	0,251	0,181	0,135	2,942	6,095	0,050
RS-15	72,690	14,841	1,555	0,646	0,222	0,131	0,122	4,190	5,482	0,121
RS-16	72,016	14,182	2,706	1,076	0,372	0,392	0,164	3,651	5,421	0,020
RS-17	74,945	12,774	2,325	0,968	0,16	0,21	0,097	2,854	5,648	0,020
RS-20	76,161	13,493	0,49	0,93	0,1	0,03	0,031	5,247	3,508	0,010
RS-24	60,200	18,600	4,530	3,170	1,060	0,98	0,32	4,940	6,110	0,090
RS-25	75,889	12,913	1,599	0,785	0,169	0,149	0,133	2,742	5,602	0,020
RS-27	53,050	16,976	9,690	7,356	3,749	2,173	1,185	3,628	2,061	0,131
RS-28	60,968	17,778	7,493	1,858	3,666	1,035	0,122	3,124	3,867	0,090
RS-29	51,393	15,829	10,920	7,053	5,540	2,975	1,351	3,106	1,703	0,130
RS-30	74,367	14,754	0,618	0,409	0,1	0,02	0,192	6,001	3,529	0,010
RS-32	65,413	15,546	6,097	3,069	0,323	0,646	0,286	3,654	4,886	0,081
RS-33	62,576	15,519	7,419	3,044	1,121	1,121	0,509	3,865	4,726	0,100
RS-34	62,724	16,506	6,813	2,741	0,52	0,71	0,281	3,661	5,932	0,110
RS-35	76,607	12,017	1,853	0,651	0,1	0,16	0,04	3,815	4,737	0,020

## Caracterização geoquímica das principais rochas ornamentais beneficiadas no Espírito Santo

RS-36	72,693	15,441	0,692	0,822	0,1	0,06	0,054	4,362	5,765	0,010
-------	--------	--------	-------	-------	-----	------	-------	-------	-------	-------

### CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA

No diagrama de classificação de MIDDLEMOST (1985) que considera o conteúdo de  $\text{SiO}_2 \times (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ , Figura 6, observa-se que não há valores muito destoantes quando comparada a classificação do diagrama QAP (Figura 5). As amostras do Grupo 1 foram classificadas unicamente como granitos. Duas amostras de cor cinza que compõem o Grupo 2 são quartzo monzonitos e as demais amostras, caracterizaram-se como granitos. Em contrapartida, as amostras do Grupo 3 obtiveram classificação distinta. Duas amostras de cor preta (27 e 29) permaneceram com a mesma classificação do diagrama QAP (STRECKEISEN, 1974). As amostras verdes (portadoras de hiperstênio) foram classificadas como quartzo monzonito, onde os campos análogos, dessa classificação no diagrama das rochas charnockíticas de Le Maitre (1989), correspondem ao quartzo manjerito e outra foi classificada como sienito. As amostras do Grupo 4, com exceção da RS-28 (que não foi plotada em nenhum dos diagramas de classificação magmática) em sua maioria se classificaram no campo dos granitóides.

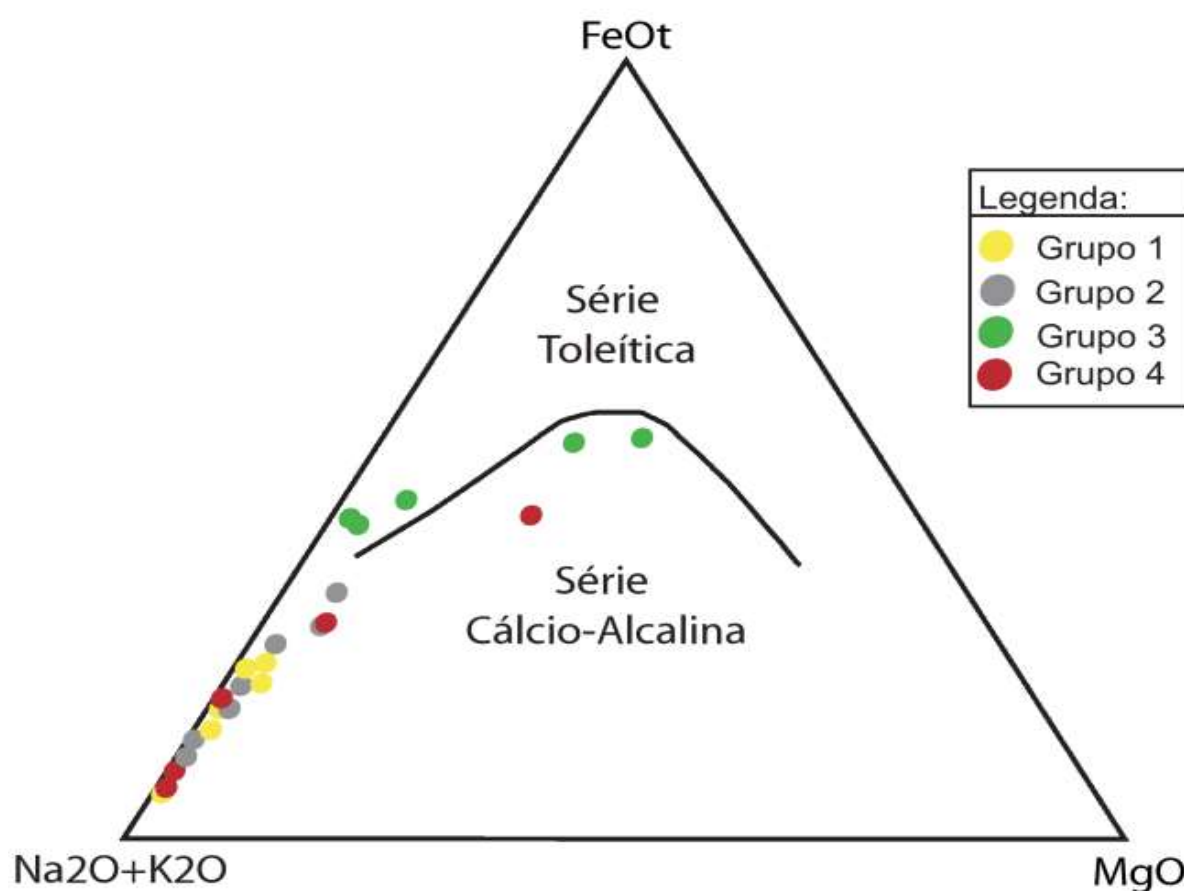


**Figura 6** - Diagrama de classificação geoquímica, segundo MIDDLEMOST (1985).  
Fonte: Autores.

### CARACTERIZAÇÃO SERIAL

No diagrama AFM (Figura 7) que mostra o grau de diferenciação das amostras pelo

teor de álcalis, observa-se uma maior concentração, principalmente dos grupos 1, 2 e 4, próxima à linha AF, pois são granitoides e são mais diferenciados quanto ao teor de álcalis. Quando comparamos com o Grupo 3, percebe-se que estas estão localizadas nas porções centrais do diagrama, próximo à curva que delimita a passagem da série cálcio-alcálica para a série toleítica, o que demonstra que as mesmas são menos diferenciadas. Algumas rochas possuem um maior empobrecimento em MgO, enquanto outras (as de composição básica) possuem proporções medianas de FeO, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O e MgO. Apesar de não possuir características físicas parecidas, as amostras do Grupo 4 se concentram próximas da linha AF, com exceção do pegmatito, que se encontra próximo às duas amostras de composição básica do Grupo 3. Apesar das amostras estarem situadas no campo da série cálcio-alcálica, não possuem relação quanto à série co-magmática.



**Figura 7** - Caracterização serial das amostras beneficiadas no sul do Espírito Santo, diagrama AFM (Irvine + Baragar - 1971). Fonte: Autores.

## CONCLUSÃO

As rochas analisadas nesse trabalho, beneficiadas no município de Cachoeiro de Itapemirim-ES, possuem, em sua maioria, uma similaridade quanto à composição e classificação petrológica. Os granitóides portadores de granadas do Grupo 1 e 2, produtos de anatexia, podem ter sido gerados, devido ao alto grau metamórfico ao qual foram submetidas as rochas de composições pelíticas. Este fator justificaria a presença dos diatexitos e granitos peraluminosos com granada.

Quanto ao estudo do nível de alteração das rochas, conclui-se que as amostras amarelas notoriamente possuem essa coloração em função da alteração dos feldspatos,

## **Caracterização geoquímica das principais rochas ornamentais beneficiadas no Espírito Santo**

mostrando que estas foram provavelmente extraídas de porções superficiais do afloramento rochoso, onde há maior contato com os agentes intempéricos, possibilitando reações físico-químicas na rocha. As rochas de coloração branca possuem um nível de alteração menos avançado por se localizarem em porções onde o contato com o intemperismo é menor. As rochas charnockíticas (Grupo 3) têm como característica conspícua a coloração verde em amostras macroscópicas; entretanto, não foi observado um alto grau de alteração em comparação com as rochas do Grupo 1. A atribuição das cores avermelhada/rosada nas rochas do Grupo 4 é devida à tonalidade do K-feldspato (microclina). A cor avermelhada da microclina é dada possivelmente por um magma com menores teores de H<sub>2</sub>O.

Pela caracterização química, a classificação das amostras sofreu variações quanto aos grupos de acordo com diferentes critérios. As amostras dos Grupos 1, 2 e 4, na maioria das vezes, obtiveram classificações similares: granitos com composição cálcio-alcalina e o Grupo 3, também permaneceu com classificações semelhantes ficando próximo à curva que delimita a passagem da série cálcio-alcalina para a série toleítica, sendo rochas menos diferenciadas, como os monzodioritos.

Algumas rochas com características físicas e composicionais distintas recebem o mesmo nome comercial, da mesma forma ocorre o inverso, onde uma rocha com mesmas qualificações petrológicas recebem nomes comerciais diferentes. Como exemplo, citam-se os granitoides de cor amarela, branca e vermelha (Grupos 1, 2 e 3) que recebem nomes comerciais distintos, porém muitas possuem características petrográficas e geoquímicas semelhantes. Por outro lado, rochas de gêneses diferentes recebem o mesmo nome comercial (como exemplo, tem-se o Ouro Brasil que em uma empresa a rocha que recebe esse nome é magmática e em outra é metamórfica). Sendo assim, para um trabalho científico mais aprofundado com rochas ornamentais deve-se considerar as normas técnicas de classificação petrográfica e não as usuais do mercado de rochas ornamentais.

Pelos conceitos da série de Bowen, pode-se dizer que as rochas que usualmente são mais enriquecidas em quartzo e feldspato costumam ser mais resistentes ao intemperismo, podendo assim ser utilizadas em áreas externas. Em contrapartida, rochas com maior concentração de minerais máficos tendem a uma maior alteração, sendo mais indicadas para revestimento de áreas internas. Esses estudos dão melhores resultados quando são auxiliados pela petrografia, já que aspectos texturais também interferem no grau de alteração das rochas. Há casos em que rochas de composição química semelhantes apresentam grau de alteração diferentes e isso se deve na maior parte das vezes por características texturais e grau de fraturamento das mesmas. Por esta razão, estudos a cerca das características petrográficas e geoquímicas das rochas ornamentais devem ser sempre realizados, levando-se em consideração as características do local de onde estas rochas foram extraídas, bem como analisando-se o método de lavra utilizado para sua extração, já que este pode causar fraturamento do material rochoso que neste caso não teriam relação com a formação da rocha, mas sim pela ação antrópica ou seja pela escolha do método inadequado para extração do material. Além destas, questões como uso de insumos inadequados durante a aplicação das rochas nos empreendimentos e obras podem ser os responsáveis por diversos casos de alteração do material rochoso após certo tempo, já que não se tem muito investimento em estudos visando a análise do comportamento das rochas naturais em contato com estes produtos como por exemplo, argamassas de assentamento e fixação dos materiais, entre outros.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABIROCHAS/CETEM. **Catálogo de rochas ornamentais do Brasil**. Rio de Janeiro. 2001.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Catálogo ABNT**. Rio de Janeiro. 360p. 1995.

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S.; FONSECA, M. A. **Assembly Western Gondwana in the Neoproterozoic: Clues from the São Francisco craton region, Brazil**. *Geology*, 29:319-322. 2001.

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CRUZ S.; PERES, G. G.; WHITTINGTON A. G. **Tectônica Quebra-Nozes e a Gênese do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental**. In: SBG, Simp. Nac. de Estudos Tectônicos, 9, Boletim de Resumos, p. 40-43. 2003.

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S.; PEDROSA-SOARES, A.C.; PERES, G. G.; CRUZ, S.C. P. & WHITTINGTON, A. **Kinematic evolution of the Araçuaí–West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana**. *Precambrian Research*, 149:43-63. 2006.

ALMEIDA, F. F. M. **O Cráton de São Francisco**. *Revista Brasileira de Geociências*, 7:349-364. 1977.

FISCHEL, D. P. **Geologia e dados isotópicos Sm-Nd do Complexo Mantiqueira e do Cinturão Ribeira na região de Abre Campo, Minas Gerais**. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, M.Sc. thesis, 99 p. 1998.

FRASCÁ, M. H. B. de O. **Caracterização tecnológica de rochas ornamentais e de revestimento: estudo por meio de ensaios e análises e das patologias associadas ao uso**. In: III Simpósio sobre Rochas Ornamentais do Nordeste, Anais, Recife, PE. 2002.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS, Neto M.; SILVA, L.C.; TROUW, R. A. J.; JANASI, V. C. **A Província Mantiqueira**. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito Neves (eds.) *O Desvendar de um Continente: A Moderna Geologia da América do Sul e o Legado da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Ed. Beca, cap. XIII, p. 203-234. 2004a.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, M.; SILVA, L.C.; TROUW, R. A. J.; JANASI, V. C. **Brasiliano Belts in SE Brazil**. *Journal of Virtual Explorer*, Volume 17, [www.virtualexplorer.au](http://www.virtualexplorer.au). 2004b.

LE MAITRE, R W, and 11 others (editors). **A classification of igneous rocks and glossary of terms**. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. (Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications.) 1989.

MACHADO, M. E. S. **Caracterização petrológica e química de rochas ornamentais beneficiadas no Espírito Santo**. Monografia, Universidade Federal do Espírito Santo. Alegre-ES p. 100. 2012.

MARQUES, R. A.; MACHADO, M. E. S.; VELASCO, T. C. **Petrografia das principais rochas ornamentais beneficiadas no ES: Descrição macroscópica e microscópica**. NEA. Beau Bassin. p. 89. 2017.

MENEZES, R. G. de.; LARIZZATTI, J. H. **Rochas ornamentais e de revestimento:**

- Caracterização geoquímica das principais rochas ornamentais beneficiadas no Espírito Santo**  
**conceitos, tipos e caracterização tecnológica: curso de especialização em mármore e granitos.** Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/trab\\_menezes.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/trab_menezes.pdf)>. Acessado em: 06 Nov 2011. 2005.
- MORAES, J. M.; RIBEIRO, R.C. da C.; CORREIA, J. C. G.; CARANASSIOS. **Caracterização tecnológica de Rochas Ornamentais do estado do Espírito Santo.** 2008.
- NOCE, C. M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; SILVA, L. C.; ALKMIM, F. F. **O embasamento arqueano e paleoproterozóico do Orógeno Araçuai.** Geonomos, 15(1):17-23. 2007.
- PEDROSA-SOARES, A. C.; VIDAL, Ph.; LEONARDOS, O. H.; BRITO-NEVES, B. B. **Neoproterozoic Oceanic Remnants in Eastern Brazil: Further Evidence and Refutation of an Exclusively Ensialic Evolution for the Araçuai- West Congo Belt.** Geology, 26:519-522. 1998.
- PEDROSA-SOARES, A. C.; WIEDEMANN, C. M.; FERNANDES, M. L.S.; FARIA, L. F.; FERREIRA, J. C. H. **Geotectonic significance of the neoproterozoic granitic magmatism in the Araçuai belt, eastern Brazil: a model and pertinent questions.** Rev. Bras. Geociências, 29(1): 59-66. 1999.
- PEDROSA-SOARES, A. C.; WIEDEMANN-LEONARDOS, C. M. **Evolution of the Araçuai Belt and its connection to the Ribeira Belt, Eastern Brazil.** In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz-Filho, D.A. Campos (ed.), Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro, IGC Brazil 2000, 265-285. 2000.
- PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; WIEDEMANN, C.; PINTO, C. P. **The Araçuai-West-Congo Orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly.** Precambrian Res., 110: 307-323. 2001.
- PEITER, C.C. et al. **Rochas Ornamentais no século XXI: bases de desenvolvimento sustentado das exportações brasileiras.** Rio de Janeiro: Cetem/Abirochas. 150p. 2001.
- SILVA, L. C.; MCNAUGHTON, N. J.; ARMSTRONG, R.; HARTMANN, L. A.; FLETCHER, I. **The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections: a zircon-based U-Pb geochronologic subdivision for the Brasiliano/Pan-African systems of orogens.** Precambrian Res., 136: 203-240. 2005.
- SÖLLNER, F.; LAMMERER, B.; WIEDEMANN, C. M. **Dating the Ribeira Mobile Belt of Brazil.** In: Sonderheft-Zeitschrift für Angewandte Geologie. Hannover/2000, 245-255. 2000.
- VARGAS, T.; MOTOKI, A.; NEVES, J. L.P. 2001. **Rochas Ornamentais do Brasil, Seu Modo de Ocorrência Geológica, Variedade Tipológica, Exploração Comercial e Utilidades como Materiais Nobres de Construção.** Disponível em: <<http://rochasornamentais1.tripod.com/2001/Itu2/Itu2.pdf>>. Acesso em: 29 de março de 2012.
- VETORAZZI, H. **Ambientação geológica e características tecnológicas de Granitos comerciais lavrados no Espírito Santo.** p. 4. 2012.
- WIEDEMANN, C. M.; MEDEIROS, S. R. de; LUDKA, I. P.; MENDES, J.C.; MOURA, J. C. **Architecture of late orogenic plutons in the Araçuai-Ribeira fold belt, southeast Brazil.** Gondwana Research, 5: 381-400. 2002.

STRECKEISEN, A. **Classification and nomenclature of plutonic rocks recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks.** Geologische Rundschau, Stuttgart, Vol. 63, 773–785. 1974.

STRECKEISEN, A. **To each plutonic rock, its proper name.** Earth Science Review, 12(1):1-33. 1976.





## Capítulo 6

### Ocorrência e aspectos mineralógicos da escapolita azul de Italva - RJ

*Meridiana Mendonça de Freitas<sup>1</sup>, Rodson De Abreu Marques<sup>1</sup>, Edgar Batista de Medeiros Júnior<sup>2</sup>, Raissa Belotti de Mesquita<sup>3</sup>, Gláucia Nascimento Queiroga<sup>2</sup>, Marco Paulo de Castro<sup>2</sup>, Débora Vasconcelos de Oliveira<sup>2</sup>, Carolina Valentim Telles<sup>1</sup>, Bruno Pagung Santi Soares<sup>1</sup>, Victor Bicalho da Silva<sup>4</sup>*

## INTRODUÇÃO

A área de estudo localiza-se na região sudeste do Brasil, a norte do estado do Rio de Janeiro, no interior do município de Italva, e insere-se na porção setentrional da Faixa Ribeira. A compartimentação tectônica, compreende quatro terrenos tectono-estratigráficos: Ocidental, Oriental, Paraíba do Sul/Embú e Cabo Frio. O terreno Oriental foi subdividido em três compartimentos tectônicos: Domínio Cambuci, Domínio Costeiro e o Domínio Italva ou klippe de Italva, (descritos em trabalhos como TUPINAMBÁ et al., 2007; HEILBRON et al., 2004; HEILBRON e MACHADO, 2003).

O mineral de escapolita azul encontra-se presente na unidade São Joaquim (NP3itsj) do Domínio Italva, próximo ao contato do mármore com um granito cinza. Tais litologias estão inseridas na lente mapeável de mármore que possui uma configuração na forma de ferradura, chamada de “Ferradura de Italva”, definida por Machado Filho et al. (1983), com extensão total na ordem de 13km e largura de 1km, representada por uma dobra sinforme (DUARTE et al., 2012a).

O principal objetivo deste trabalho é o estudo de técnicas analíticas realizadas através da microanálise eletrônica a fim de analisar a química mineral, as condições e as demais fases minerais conspícuas a geração da escapolita. É justificado pela ocorrência relativamente rara da escapolita azul e de estudos relacionados a ela, com isso o trabalho contribuirá com informações geológicas, a respeito de sua composição química ou sobre a gênese.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA/GEOLOGIA REGIONAL

O Terreno Oriental da Faixa Ribeira, de acordo com Heilbron & Machado (2003) é compartimentado em três Domínios Tectônicos, sendo eles, da base para o topo: Domínio Cambuci, Domínio Costeiro e Domínio Italva, ambos associados ao desenvolvimento de arcos magmáticos no neoproterozóico (TUPINAMBÁ et al., 2007).

O Domínio ou Klippe de Italva encontra-se estruturalmente na porção superior do Terreno Oriental e como uma klippe sinforme sobre o Domínio Costeiro. Trabalhos pioneiros de Lamego (1940), Menezes (1975), Costa et al. (1978a, 1978b), Matos et al. (1980), e Grossi-Sad e Dutra (1988) incluíram as litologias da Klippe de Italva no Grupo Paraíba do Sul, além de sugerirem um ambiente tectônico de back-arc para o conjunto. Machado Filho et

<sup>1</sup> Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo, CCENS, Alegre, ES

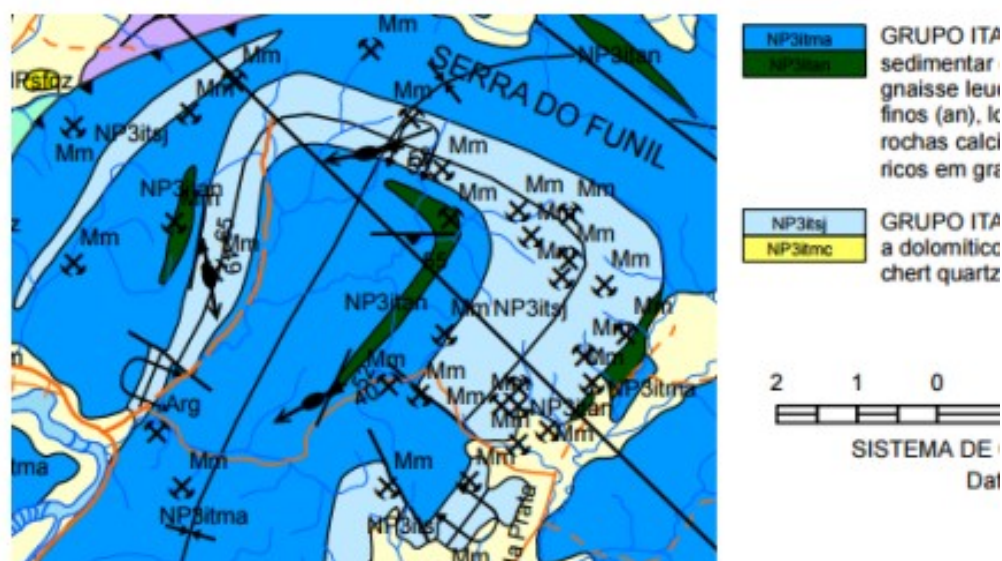
<sup>2</sup> Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG

<sup>3</sup> Serviço Geológico do Brasil, CPRM – Manaus, AM, Brasil

<sup>4</sup> Programa de Pós-graduação em Geociências – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS

al. (1983) definiram o Grupo Italva, separando o conjunto do Complexo Paraíba do Sul. Tupinambá et al. (2007) adotaram o termo Grupo Italva e o definiram como um conjunto metavulcano-sedimentar, rico em mármore e anfibolitos, onde o metamorfismo principal não ultrapassa os limites da fácies anfibolito, e a deformação principal é moderada, caracterizada por uma xistosidade grossa, além de dobras recumbentes a reclinadas.

Machado Filho et al. (1983) definiram o Grupo Italva como um conjunto metavulcano-sedimentar constituído de granada-hornblenda gnaisses, mármore e anfibolitos. O Grupo Italva, aos arredores da região de Itaperuna, é constituído por cinco unidades de mapeamento: Unidade Serra da Prata; Unidade Macuco; Unidade São Joaquim; anfibolito; e metachert (DUARTE et al., 2012b) (Figura 1). Dentre estas unidades, a de interesse para a realização deste trabalho é a Unidade São Joaquim.



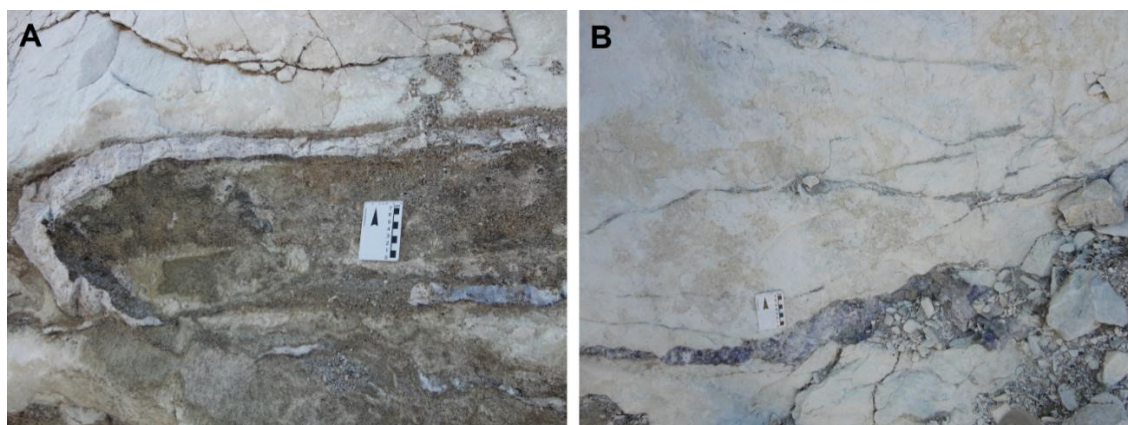
**Figura 1** - Porção do mapa da Folha Itaperuna, em escala 1:100.000, onde se encontra a área estudada (NP3itaj, Grupo Italva). Fonte. Modificado de Duarte et al. (2012b).

A Unidade São Joaquim representa uma sequência metacarbonática, posicionada estruturalmente acima dos gnaisses da Unidade Macuco, gerando uma intercalação entre mármore e gnaiss com contatos bruscos (por falhas) ou gradacionais. A Unidade é composta por mármore calcítico a dolomítico rico em grafita, com intercalações de anfibolito, rochas meta-ultramáficas, calcissilicáticas e metachert quartzoso. O mármore dessa unidade não possui dominância entre calcítico ou dolomítico. Estruturalmente possui bandamento marcado por diferenças granulométricas ou composicionais e mineralogicamente é composto por carbonato (calcita e dolomita), diopsídio, tremolita, flogopita, olivina, pirita e grafita. Serpentina e clorita ocorrem como fases secundárias. Corpos centimétricos a métricos de anfibolitos (bancos contínuos, bandas, lentes ou boudins) ocorrem associados ao mármore da Unidade São Joaquim, gerando bordas de reação no contato, ricas em epidoto e biotita. Bandas de rochas calcissilicáticas de coloração verde médio a escuro e granulação média à grossa também ocorrem associadas aos mármore. Rochas meta-ultramáficas, compostas basicamente de tremolita-actinolita e plagioclásio, ocorrem localmente associadas ao conjunto (DUARTE et al., 2012a).

### DESCRIÇÃO DO PONTO DA ESCAPOLITA AZUL

Segundo Silva et al. (2017), a amostra do mineral foi encontrada no interior do município de Italva, em uma pedreira, que no ano de 2013 estava ativa para a fabricação de

cimento. As coordenadas UTM são (E 0222589m / N 7636471m e Elevação: 115m, 24K. O mármore branco é invariavelmente de granulação grossa, intercalado com um mármore de coloração cinza e granulação muito grossa. Neste local, ainda foram encontrados outro mármore cinza claro de granulação média, uma rocha de coloração escura com níveis espessos de granada de granulação grossa, que intrude o mármore e um granitoide leucocrático foliado, visto na forma de fragmentos ou intrudindo também o mármore (Figura 2a). Por fim, foi observada a escapolita, contida no mármore, na forma de um nível de espessura centimétrica. O mineral é de granulação média a grossa e no contato do veio de escapolita com o mármore ocorre um material de cor verde claro (Figuras 2b e 3).



**Figura 2** - Afloramento da escapolita azul; A- Afloramento, composto pelo mármore, rocha escura com granitoide leucocrático foliado (dobrado, na forma de fragmentos ou intrudindo o mármore); B- Nível centimétrico do mineral escapolita contido no mármore. Coordenadas do ponto: E 0222589m / N 7636471m com escala apontando para o Norte.  
Fonte. Silva et al. (2017)

## METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado em quatro etapas distintas, sendo elas: levantamento bibliográfico, obtenção, tratamento e interpretação dos dados.

Na etapa de levantamento bibliográfico foi realizado o estudo detalhado da área, com revisão do contexto geológico e geográfico, tanto em escala regional (Província Mantiqueira) como em escala local (Grupo Italva). Para a realização dessa etapa foi consultado o mapa geológico da região (Folha Itaperuna, escala 1:100.000 – SF.24-V-C-I; Duarte et al., 2012b), bem como a leitura do trabalho de Silva et al. (2017). A etapa da obtenção de dados foi realizada no Laboratório de Microanálises do Departamento de Geologia da Escolas de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Inicialmente a amostra de escapolita estudada foi metalizada, processo que consiste em recobrir a pastilha com uma fina camada de carbono. Os dados químicos semi-quantitativos, os mapas composicionais, os gráficos de espectros de raios-x e as imagens de elétronsretroespalhados foram obtidos utilizando um MEV da marca JEOL, modelo JSM-6510, utilizando uma voltagem de 10Kv, uma work distance (distância de trabalho) de 12mm e um spot size (tamanho do feixe) de 75. Posteriormente os dados químicos foram tratados utilizando o programa Minpet 2.02 (RICHARD, 1995).



**Figura 3** - Afloramento mostrando a escapolita azul nos mármore de Italva, vista em detalhe do nível centimétrico do mineral. Coordenadas do ponto: E 0222589m / N 7636471m.  
Fonte. Silva et al. (2017)

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### IMAGENS ELETRÔNICAS DE VARREDURA

A amostra analisada é composta por três minerais, sendo eles: a escapolita, mineral de interesse desse trabalho, o feldspato e a calcita. Na imagem da figura 4, a tonalidade em cinza escuro é corresponde ao mineral de feldspato, as poucas porções em branco correspondem a calcita e em sua maioria, as porções em tonalidade de cinza claro referem-se à escapolita. Além disso, é possível observar pequenas porções de coloração preta dentro do mineral feldspato.

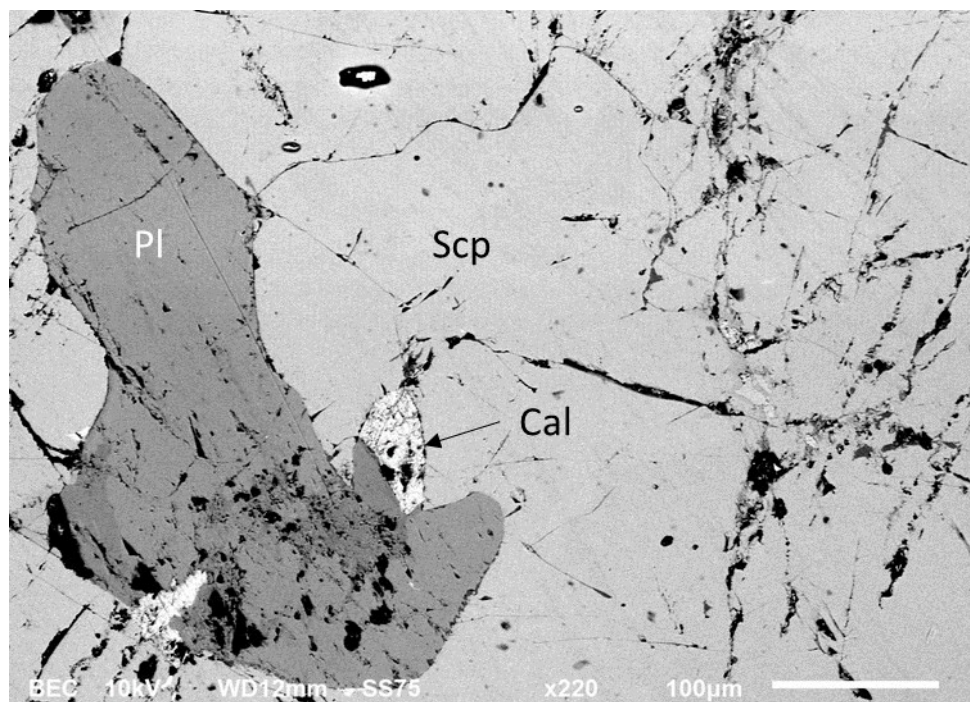
### ESCAPOLITA

Para a confecção do diagrama de classificação da série escapolita, foram consideradas as propostas da Commission on New Minerals and Mineral Names (CNMMN) de 1986. A classificação foi realizada com base na razão  $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Na})$  (DEER et al., 1992) (Figura 5), utilizando-se os dados de cálcio e sódio gerados pelo Minpet.

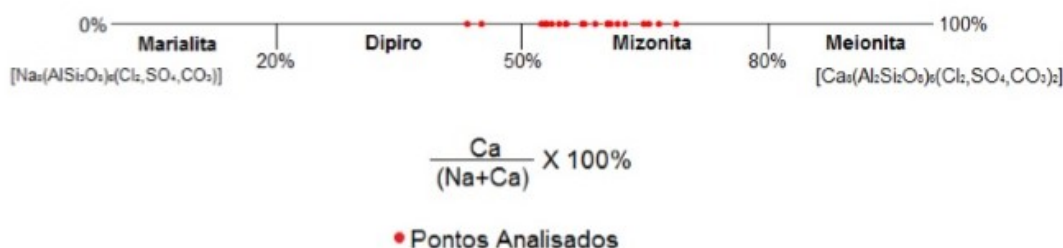
### FELDSPATO

Os dados químicos semi-quantitativos, produzidos para a confecção do diagrama, referem-se ao cálculo da porcentagem de cálcio, sódio e potássio para a classificação dos minerais em albita, anortita ou ortoclásio. As análises referentes ao feldspato foram, predominantemente, projetadas na série do plagioclásio, no campo do oligoclásio e andesina (An18-38). Ocorre também, minoritariamente, pontosque são classificados como anortita (An98-99). Apenas um ponto é referente ao anortoclásio. As análises projetadas no campo do ortoclásio representam as lamelas de exsolução.





**Figura 4** - Imagem de elétrons retroespalhados gerada pelo MEV mostrando escapolita (Scp), plagioclásio (Pl) e calcita (Cal). Fonte: Autores



**Figura 5** - Classificação dos minerais da série escapolita. Fonte: Modificado de Deer et al. (1992).

De forma geral, as análises para a série escapolita foram, em sua maioria, projetadas no campo da mizonita (Ma50Me50 – Ma20Me80), oscilando entre 0,55 a 0,70 da razão  $\text{Ca}/(\text{Na}+\text{Ca})$ . Alguns pontos projetam-se no campo do dipiro (Ma80Me20 – Ma50Me50), entre 0,40 a 0,45 da reação já citada.

## ESPECTRO DE RAIOS-X

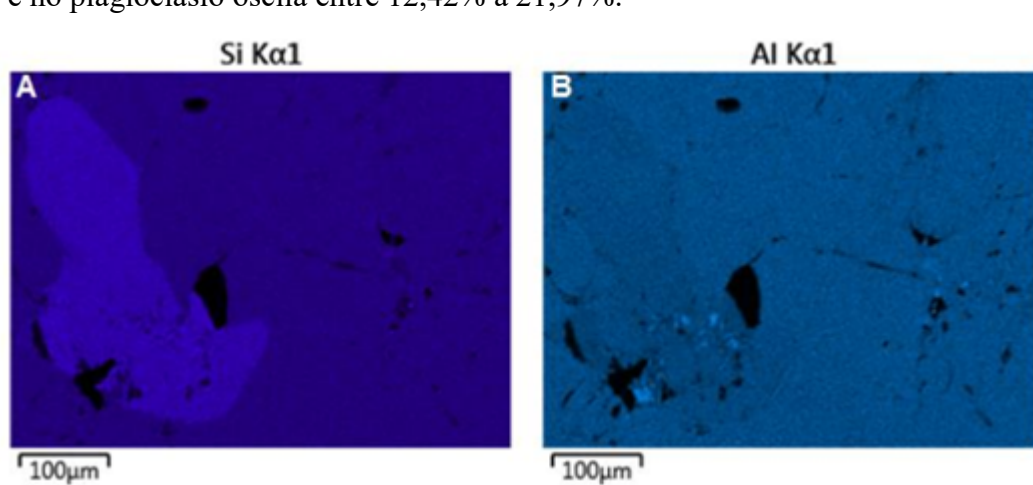
Ao analisar-se os espectros dos minerais de escapolita, observa-se que há certa regularidade na quantidade em cps/eV de cada elemento de um espectro para o outro. Nota-se que a quantidade de sílica (Si) e alumínio (Al) variam em pequenas proporções de um espectro para outro e que o enxofre (S) possui uma distribuição heterogênea, ou seja, sua ocorrência se dá de forma pontual. Em geral a quantidade de oxigênio (O) varia em torno de 220 a 390 cps/eV, a sílica (Si) entre 160 a 250 cps/eV, o alumínio (Al) oscila entre 130 a 180 cps/eV, o sódio (Na) em torno de 35 a 60 cps/eV, o cálcio (Ca) gira em torno de 30 cps/eV e

os elementos como enxofre (S), cloro (Cl) e magnésio (Mg) variam próximo de 10 a 20 cps/eV.

Nos espectros correspondentes ao plagioclásio os elementos silício (Si), alumínio (Al), sódio (Na) e cálcio (Ca) variam composicionalmente no plagioclásio. Em sua maioria, apresentam uma quantidade de oxigênio (O) que varia entre 260 a 400 cps/eV, a sílica (Si) em torno de 220 a 300 cps/eV, o sódio (Na) varia entre 60 a 90 cps/eV e o cálcio (Ca) oscila entre 10 a 20 cps/eV, contudo, algumas particularidades ocorrem, por exemplo, presença de menos que 10 cps/eV de ferro (Fe), há também espectro que apresenta uma quantidade elevada de cálcio (Ca), com cerca de 60 cps/eV, este ponto foi classificado como anortita no diagrama de classificação, há um ponto em que foi analisado a presença de menos que 10 cps/eV de potássio e juntamente com os espectros outros três foram identificados a presença de estrôncio (Sr) com quantidade próximo a 70 cps/eV.

### MAPAS QUÍMICOS COMPOSICIONAIS

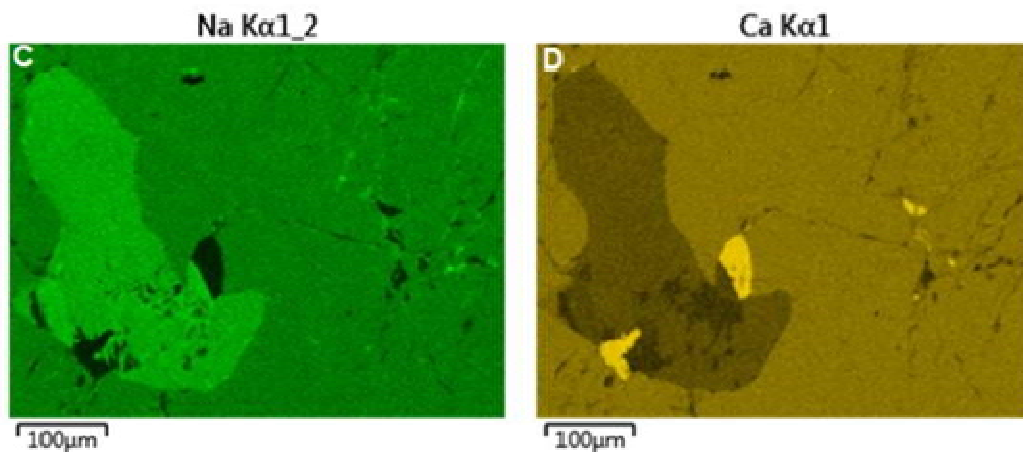
Os mapas químicos composicionais evidenciam a presença dos seguintes elementos: Si, Al, Na, Ca, Mg, S, Cl e K. Para se produzir os devidos mapas foi utilizada uma imagem eletrônica de varredura padrão. Para auxiliar na interpretação dos mapas foram utilizadas as tabelas referentes aos dados químicos quantitativos dos elementos de cada mineral. A figura 6A aborda a quantidade de sílica (Si) presente nos minerais analisados. De modo geral, o plagioclásio, representado pela tonalidade em azul mais claro e mais brilhante, possui a maior quantidade de sílica presente em sua estrutura, seguido da escapolita, correspondente ao azul mais escuro com menos brilho, e, por fim, a calcita, caracterizada pela cor preta, indicando a ausência de sílica. Analisando-se os dados quantitativos, a porcentagem de sílica presente na escapolita oscila entre 22,87% a 25,1%, no plagioclásio varia entre 18,48% a 30,88 % e na calcita entre 0,16% a 0,56%. Na figura 6B, tanto o plagioclásio quanto a escapolita possuem uma quantidade equivalente de alumínio (Al) em sua composição, portanto há alguns pontos esbranquiçados e com um brilho mais intenso, presentes dentro do plagioclásio, indicando uma quantidade superior de Al e, por fim, a calcita, representada pela cor preta indicando a ausência do elemento. Ao analisar apenas as porcentagens do teor da escapolita e do plagioclásio foi verificado que o alumínio presente na escapolita varia em torno de 13,44% a 14,91% e no plagioclásio oscila entre 12,42% a 21,97%.



**Figura 6** - Mapas químicos composicionais, (A) evidencia o elemento Si, (B) evidencia o elemento Al. Fonte: Autores.

A figura 7C, mostra um teor elevado de sódio (Na) presente no plagioclásio, representando por uma tonalidade mais clara do verde e com brilho mais intenso, quando comparado ao mineral escapolita, este caracterizado por uma tonalidade mais escura e com menos brilho. Portanto, em algumas porções do plagioclásio a ocorrência pontual de cor preta caracteriza a ausência de Na. A calcita encontra-se com uma coloração quase preta, indicando um teor quase insignificante do elemento. A escapolita apresenta um teor de sódio que varia em torno de 3,16% a 5,62%, o plagioclásio oscila entre 0,17% a 6,92% e a calcita entre 0,11% a 0,17%. Na figura 7D a calcita destaca-se na imagem com uma coloração esbranquiçada e brilhante, indicando um alto teor de cálcio. Em seguida a escapolita, representada por uma tonalidade mais clara de amarelo e com mais brilho, apresenta uma quantidade maior de cálcio quando comparada ao plagioclásio, que é caracterizado por uma tonalidade escura e com brilho menos intenso, contudo, a porção inferior do plagioclásio possui porções mais escuras caracterizando pouca concentração de cálcio. O teor de Cálcio na escapolita é em torno de 7,5% a 12,15%, no plagioclásio 0,58% a 19,78% e na calcita 69,6% a 71,06%.

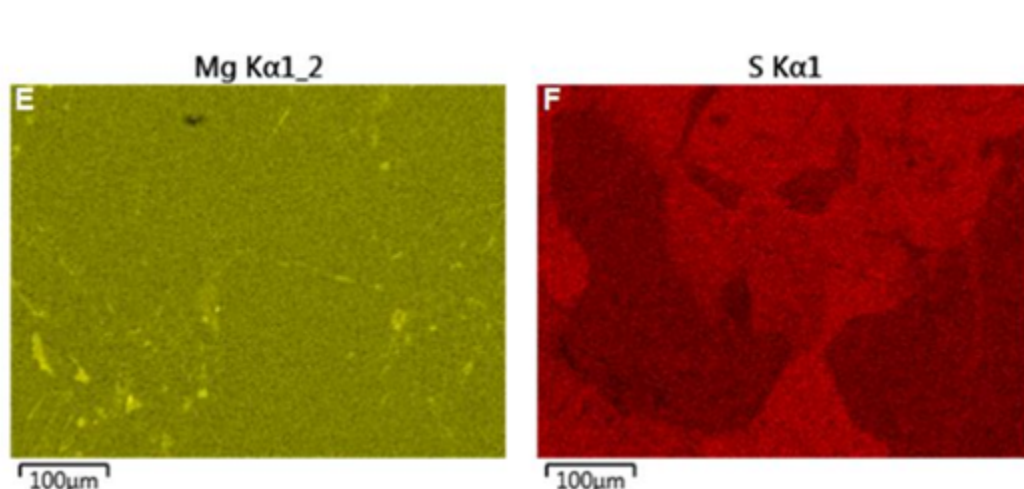
Na figura 8E o magnésio (Mg) se faz presente em pequenas quantidades tanto no plagioclásio como na calcita e sua ocorrência se dá de forma pontual, caracterizado por uma tonalidade mais clara e um brilho mais intenso. Já no mineral escapolita o Mg é ausente. Analisando os dados quantitativos do plagioclásio e da calcita, é possível verificar que o magnésio que compõem o plagioclásio varia entre 0,09% a 0,14% e na calcita oscila entre 1,02% a 1,03%. Na figura 8F a forma de ocorrência do enxofre (S) apresenta um formato particular, que não é observado na imagem em tons de cinza, é possível interpretar que somente a escapolita é composta por enxofre, representada na imagem por uma tonalidade mais clara do vermelho e um brilho mais intenso, mesmo que em pequenas quantidades sua distribuição se dá de forma heterogênea, ou seja, porções da escapolita é ausente, ou quase ausente, de enxofre. A escapolita é composta por um teor de enxofre que varia entre 0,13% a 1,11%.



**Figura 7** - Mapas químicos composicionais, (C) evidencia o elemento Na, (D) evidencia o elemento Ca. Fonte: Autores.

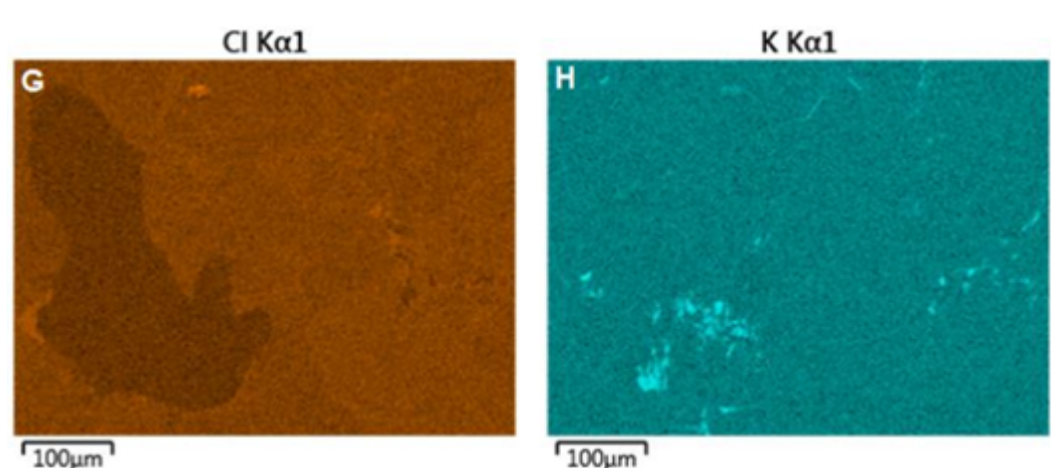
Na figura 8E o magnésio (Mg) se faz presente em pequenas quantidades tanto no plagioclásio como na calcita e sua ocorrência se dá de forma pontual, caracterizado por uma tonalidade mais clara e um brilho mais intenso. Já no mineral escapolita o Mg é ausente. Analisando os dados quantitativos do plagioclásio e da calcita, é possível verificar que o magnésio que compõem o plagioclásio varia entre 0,09% a 0,14% e na calcita oscila entre 1,02% a 1,03%. Na figura 8F a forma de ocorrência do enxofre (S) apresenta um formato particular, que não é observado na imagem em tons de cinza, é possível interpretar que somente a escapolita é composta por enxofre, representada na imagem por uma tonalidade

mais clara do vermelho e um brilho mais intenso, mesmo que em pequenas quantidades sua distribuição se dá de forma heterogênea, ou seja, porções da escapolita é ausente, ou quase ausente, de enxofre. A escapolita é composta por um teor de enxofre que varia entre 0,13% a 1,11%.



**Figura 8** - Mapas químicos composicionais, (E) elemento Mg, (F) elemento S.  
Fonte: Autores.

Na figura 9G a presença de cloro (Cl), se dá em pequenas quantidades apenas no mineral escapolita, representado por uma tonalidade mais clara e um brilho mais intenso e sua distribuição ocorre de forma homogênea. Os dados quantitativos da escapolita indicam que esta é composta por um teor de cloro que oscila entre 0,5% a 1,88%. Na figura 9H o elemento potássio (K) é ausente nos minerais de escapolita e calcita, sua presença ocorre de forma heterogênea e pontual somente no plagioclásio, caracterizado por uma tonalidade mais clara e brilho mais intenso. Os dados analíticos do plagioclásio possuem um teor de potássio que varia em torno de 0,2% a 8,59%.



**Figura 9** - Mapas químicos composicionais, (G) evidencia o elemento Cl, (H) evidencia o elemento K. Fonte: Autores.



## GERAÇÃO DA ESCAPOLITA DE ITALVA E COMPARAÇÕES COM MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Nesse item será abordada a origem da escapolita, com ênfase no possível ambiente de formação, metamorfismo, metassomatismo e as relações entre os minerais presentes na amostra analisada, além de comparações com dados químicos experimentais e dados sobre pressão e temperatura, presentes na literatura.

A geração da escapolita é essencialmente restrita a ambientes metamórficos e metassomáticos e sua ocorrência se dá em uma ampla variedade de rochas regionalmente metamorfizadas que vão desde a fácies xisto verde à fácies granulito.

As variedades de escapolita mais ricas em cálcio encontram-se em rochas com grau de metamorfismo médio a elevado. Em muitas rochas metamórficas a escapolita é de origem metassomática, sendo um constituinte comum em escarnitos (DEER et al., 1992).

De acordo com Silva et al. (2017), o afloramento do tipo pedreira em que ocorre a escapolita azul é composto por um mármore branco, intercalado com um mármore de coloração cinza, uma rocha de coloração escura com níveis espessos de granada que intrude o mármore e um granitoide leucocrático foliado, visto na forma de fragmentos ou intrudindo também o mármore. A escapolita azul ocorre na forma de níveis centimétricos contidos no mármore. Como houve interação entre uma rocha carbonática (mármore) e uma silicática (granitoide leucocrático), possivelmente, o ambiente de formação da escapolita esteja relacionada à geração de escarnitos por metassomatismo. O autor supracitado descreve ainda a presença de escarnitos próximo à ocorrência da escapolita.

Os membros naturais puros (end-members) marialita e meionita, são desconhecidos e a maioria das escapolitas são de composições variando entre 0,20 a 0,80 da razão  $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Na})$ , neste trabalho observa-se que a escapolita é de composição oscilando entre 0,40 a 0,70 da razão já citada. De acordo com Deer et al. (1992), o conteúdo de elementos menores, presentes na composição da escapolita, é geralmente baixo, sendo estes  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$  e  $\text{MgO} < 0,1\%$  e  $\text{FeO} < 0,4\%$ , os resultados do presente trabalho não apresentaram tais dados, possivelmente porque o limite de detecção do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é menor que na Microsonda Eletrônica ou este fator pode estar relacionado as baixas concentrações ou ausências dos elementos menores na amostra. Entretanto no espectro de raio-x 13 foi observado a presença de menos que 10 cps/eV de ferro (Fe). Deer et al. (1992) citam ainda, que em algumas escapolitas encontra-se significativo conteúdo de  $\text{SO}_4$  nas composições, como verificado nas análises dos dados químicos quantitativos do MEV, para a escapolita pesquisada, o conteúdo de enxofre varia entre 0,13% a 1,11%, nos dados do espectro de raio-x oscila de 10 a 20 cps/eV e o mapa químico colorido ressalta a heterogeneidade do elemento. O enxofre (S) presente pode ser considerado como resultado de solução sólida com um ideal end-member sulfatado ( $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{SO}_4$ ).

Para o entendimento dos valores de temperatura e pressão durante a geração da escapolita é necessário entender a formação dos end-members marialita-meionita, bem como a reação de alguns minerais. Alguns experimentos têm sido sintetizados a partir de misturas secas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $6\text{Si}_2$  e  $\text{NaCl}$  a 1atm entre 700 e 800 °C para a formação do end-member puro marialita. A meionita pura é estável apenas a temperaturas acima de 800 °C e tem alta estabilidade termal a pressões até 18 Kbar. Em altíssimas temperaturas e pressões a meionita se quebra para formar grossularita, cianita, quartzo e calcita (GOLDSMITH e NEWTON, 1977):



Não foram realizadas medidas de temperatura da escapolita especificamente, entretanto, Marques (2009), ao estudar as paragêneses em gnaiss do Domínio Italva (próximo à área de estudo), estimou uma temperatura de  $720 \pm 20$  °C, utilizando-se o programa de Blund e Holland (1994) para os núcleos de hornblenda e plagioclásio e uma temperatura de aproximadamente 697 °C para as bordas do mesmo conjunto de minerais. Comparando as análises experimentais do autor Deer et al. (1992), Goldsmith & Newton (1977) e os dados de Marques (2009), é possível supor que o intervalo de temperatura para a formação da escapolita estudada, possa estar entre 600 a 800°C. Deve-se levar em consideração que Goldsmith & Newton (1977) analisam o end-member meionita em seu estado puro (estável acima de 800°C) e a escapolita neste trabalho é, em sua maioria, de composição mizonítica (Ma50Me50 – Ma20Me80). É importante ressaltar que a escapolita é característica de ambientes enriquecidos em CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e/ ou Cl e que sua formação não depende tanto das condições de temperatura e pressão, mas sim da oferta dos ânions citados (JORDT-EVANGELISTA, 2001).

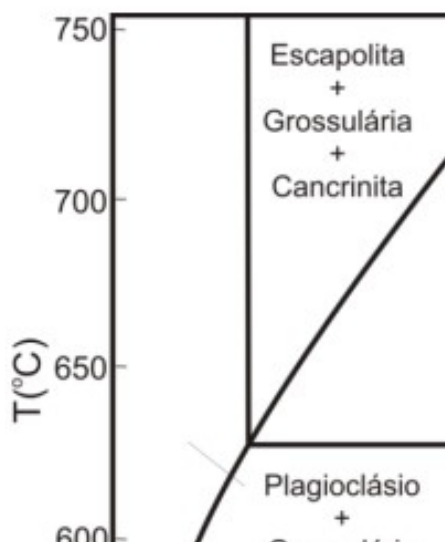
Segundo Aitken (1983), o efeito da variação composicional, na estabilidade da meionita cálcica (Me83), pode estar relacionado à presença de fluidos binários de H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>. O autor supracitado compilou dados e gerou um gráfico com relação T-XCO<sub>2</sub>, há uma pressão de fluido de 5Kbar e para uma composição  $3An_{77} + 2CaCO_3$ , mostrando os campos de estabilidade das paragêneses escapolita + grossularita+ cancrinita, escapolita + calcita, plagioclásio + calcita e plagioclásio + grossularita + cancrinita (Figura 10). A abordagem deste gráfico no trabalho é realizada, pois os dados gerados pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) revelam a interação entre os minerais de calcita e plagioclásio, que possivelmente pode ter relação com a geração da escapolita. Levando em consideração os estudos de Aitken (1983) não se pode descartar que possivelmente haja uma quantidade de CO<sub>2</sub> no sistema para a geração da escapolita estudada neste trabalho, uma vez que não foi possível medi-lo no MEV devido aos processos de metalização. Embora tenha sido feita esta relação, vale ressaltar que a composição da maioria dos plagioclásios presentes no trabalho varia de oligoclásio a -andesina (An18-38), diferente daquele do experimental.

Ao analisar o gráfico, é possível verificar que o campo da escapolita + calcita ocorre acima de 630° C e é instável na presença de fluidos onde  $XCO_2 < 0,12$  e o campo do plagioclásio + calcita ocorrem em temperaturas abaixo de 630°C na presença de  $XCO_2 > 0,4$ . A amostra analisada neste trabalho possui a presença de três minerais, sendo eles a escapolita, plagioclásio e calcita, possivelmente a escapolita + calcita formam uma paragênese, apresentando assim, as mesmas condições já citadas para este conjunto de minerais. Neste contexto o plagioclásio pode ser interpretado como o mineral que foi substituído pela escapolita.

Finalmente, Stolz (1987) resalta que a estabilidade de MeCO<sub>3</sub> e MeSO<sub>4</sub> determinada experimentalmente há altas temperaturas e pressões dá suporte para a possibilidade de que a escapolita possa atuar como um reservatório para CO<sub>2</sub> e SO<sub>4</sub> na crosta inferior e constituir uma fase líquida em magma de composições apropriadas.

## CONCLUSÃO

Levando em consideração a rara ocorrência de escapolita azul e de estudos relacionados a ela, no âmbito de metassomatismo, formação de escarnitos e principalmente do metamorfismo, associado às condições de formação do mineral, os dados apresentados neste trabalho fornecem uma contribuição para a compreensão destes requisitos. Além disso, na literatura ainda não foi descrita a ocorrência de escapolita para as rochas do Grupo Italva.



**Figura 10** - Relações de fases T-XCO<sub>2</sub>, para a composição 3An<sub>77</sub> + 2CaCO<sub>3</sub> a uma pressão de 5Kbar. Fonte. Deer et al. (1992)

A partir da microanálise eletrônica, com a utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e posterior tratamento dos dados químicos semi-quantitativos pelo Minpet 2.02 (RICHARD, 1995), foi possível classificar a escapolita, em sua maioria, como mizonita (Ma<sub>50</sub>Me<sub>50</sub> – Ma<sub>20</sub>Me<sub>80</sub>), possuindo em sua composição os elementos Na (3,16 a 5,62%), Al (13,44 a 14,91%), Si (22,87 a 25,1%), S (0,13 a 1,11%) e Cl (0,5 a 1,88%). O enxofre (S) apresenta uma distribuição heterogênea, ou seja, porções da escapolita é ausente ou quase ausente deste elemento, fato observado no mapa químico colorido do elemento enxofre. O feldspato foi classificado na série do plagioclásio, predominantemente como oligoclásio e andesina (An<sub>18-38</sub>), contendo em sua composição os elementos Si (18,48 a 30,88 %), Al (12,42 a 21,97%), Mg (0,09 a 0,14%), Ca (0,58 a 19,78%), Na (0,17 a 6,92%) e K (0,2% a 8,59%). E a calcita é composta por Na (0,11 a 0,17%), Mg (1,02 a 1,03%), Si (0,16 a 0,56%) e Ca (69,6 a 71,06%).

Comparando as análises experimentais de Deer et al. (1992), Goldsmith e Newton (1977) e os dados de Marques (2009), é possível estimar que o intervalo de temperatura para a formação da escapolita estudada, possa estar entre 600 a 800°C. A partir da análise do gráfico T-CO<sub>2</sub> de Aitken (1983), é possível supor que campo de ocorrência dos minerais escapolita + calcita, possivelmente é estável com XCO<sub>2</sub> > 0,12. A partir da análise química da escapolita azul, pode se afirmar que não houve nenhum dado químico determinante para se relacionar com a cor do mineral, logo, a cor azulada da escapolita não é devido a sua composição química. Por fim, para uma caracterização mais detalhada da região, futuras pesquisas devem ser elaboradas em detalhe, das litologias adjacentes, principalmente das rochas metassomáticas e, conseqüentemente, dos escarnitos, em busca de uma caracterização mais precisa sobre a geração da escapolita e de um melhor entendimento do metamorfismo da região.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Laboratório de Microanálises do DEGEO/EM – Laboratório integrante da RIMCc, Rede de Microscopia e Microanálises de Minas Gerais – FAPEMIG, pelos dados gerados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITKEN, B. C. **T-XCO<sub>2</sub> Stability relations and phase equilibria of calcic carbonate scapolite**. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 351-62. 1983.
- COSTA L.M., BAPTISTA J.I., SOUZA B. **Texto explicativo da Folha Geológica São João do Paraíso**. Niterói, DRM/RJ, 1978a.
- COSTA L.M., BAPTISTA J.J., SOUZA B. **Texto Explicativo da Folha Geológica Italva**. Niterói, DRM/RJ, 1978b.
- DEER W.A., HOWIE R.A., ZUSSMAN J. **An Introduction to the Rock-Forming Minerals**. Longman Scientific & Technical, London, 696 pp, 1992.
- DUARTE, B.P.; TUPINAMBÁ, M.; NOGUEIRA, J. R.; HEILBRON, M.; ALMEIDA, J. C. H.; PORTO JUNIOR, R.; MENEZES, P. T. L. 2012a. **Unidades Litoestratigráficas**. In: **Nota explicativa da Folha Itaperuna (SF.24-V-C-I)**. Programa Geologia do Brasil. Programa Geologia do Brasil. Belo Horizonte: CPRM. 2012a.
- DUARTE, B. P.; TUPINAMBÁ, M.; NOGUEIRA, J. R.; HEILBRON, M.; ALMEIDA, J. C. H.; MARQUES, R. A.; FIGUEIREDO, E.; RIBEIRO, I. S.; MOUTA, F. M.; SILVA, J. C.; MONTEIRO, A. C.; SILVA, R. R. T.; CHRISPIM, S J.; MOTOKI, A.; PORTO JUNIOR, R.; RAGATKY, D. C.; GERALDES, M. C.; GUIMARAES, P. V.; LIMA, F.; PALERMO, N. **Mapa Geológico e de Recursos Minerais da Folha Itaperuna 1:100.000 (SF 24-V-C-I)**. Programa Geologia do Brasil. Belo Horizonte: CPRM. 2012b.
- GOLDSMITH, J. R. & NEWTON, R. C. **Scapolite-plagioclase stability relations at high pressures and temperatures in the system NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>—CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>—CaCO<sub>3</sub>—CaSO<sub>4</sub>**. *Amer. Min.* 62, 1063—81, 1977.
- GROSSI-SAD, J.H.G. & DUTRA C.V. **Chemical composition of supracrustal rocks from Paraíba do Sul group**. Rio de Janeiro, Brazil. *Geochimica Brasiliensis*, 7, 143-174, 1988.
- JORDT-EVANGELISTA, H. **Propriedades Ópticas e Ocorrência dos Principais Minerais Metamórficos**. DEGEO/UFOP, p.22, 2001.
- HEILBRON M., MACHADO N. **Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira orogen (SE Brazil)**, *Precambrian Research*. 125, 87-112, 2003.
- HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, AC.; CAMPOS NETO, M.C.; SILVA, L.C.; TROUW, R.A J.; JANASI, V. A Província Mantiqueira. In: Virginio Mantesso-Neto, Andrea Bartorelli; Celso Dal Ré Carneiro; Benjamin Bley de Brito Neves. (Org.). **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. Beca, 203-234p. 2004.
- LAMEGO, A.R. **Mármore do Muriaé**. Rio de Janeiro, SGMB, 97:1-47, 1940.
- MARQUES, R. A. **Evolução metamórfica do Terreno Oriental da Faixa Ribeira entre Italva e Bom Jesus do Itabapoana, noroeste do RJ**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2009.

MACHADO FILHO, L.; RIBEIRO, M.W.; GONZALEZ, S.R.; SCHENINI, C.A.; SANTOS NETO, A.; PALMEIRA, R.G.B.; PIRES J.L.; TEIXEIRA, W.; CASTRO, H.E.F. In: **Projeto RADAMBRASIL**. Folhas SF-23/24, Rio de Janeiro/Vitória, 1.Geologia, Rio de Janeiro, MME, 27-304. 1983.

MENEZES, S.O. **Contribuição à geologia de Cantagalo, Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 45 p., 1973.  
MENEZES, S.O. As rochas carbonáticas de Cantagalo, RJ. *Mineração e Metalurgia*, 39:26-29., 1975.

RICHARD, L. R. **Minpet -Mineralogical and petrological data processing system. Minpet for Windows, version 2.02.**, 1995.

SILVA, V. B.; MARQUES, R. A.; MEDEIROS JÚNIOR, E. B. **Caracterização petrográfica e química dos mármore de Italva – RJ: aspectos de campo, lâminas delgadas e aplicações no mercado**. NovasEdiçõesAcadêmicas, Beau Bassin, 104p. 2017.

STOLZ, A. J. **Fluid activity in the lower crust and upper mantle: mineralogical evidence bearing on the origin of amphibole and scapolite in ultramafic and mafic granulite xenoliths**. *Min. Mag.*, 51, p. 719-32, 1987.

TUPINAMBÁ, M.; HEILBRON, M.; DUARTE, B.P.; NOGUEIRA, J.R.; VALLADARES, C.S.; ALMEIDA, J.C.H.; EIRADO, L.G.; MEDEIROS, S.R.; ALMEIDA, C.G.; MIRANDA, A.; RAGATKY, C.D.; MENDES, J.; LUDKA, I. **Geologia da Faixa Ribeira setentrional: Estado da Arte e Conexões com a Faixa Araçuaí**. In: *Rev. Geonomos* v.15 (1), p. 67-79. 2007.



## Capítulo 7

### **Caracterização petrográfica e micromorfológica de perfil pedogenético em rochas ultramáficas/metaultramáficas na região de Catas Altas-MG**

*Tamires Costa Velasco<sup>1</sup>, Edgar Batista de Medeiros Júnior<sup>2</sup>, Caroline Cibele Vieira Soares<sup>1</sup>, Raissa Beloti de Mesquita<sup>3</sup>, Rodson de Abreu Marques<sup>1</sup>*

## **INTRODUÇÃO**

Os estudos petrográficos relacionados às rochas ultramáficas e metaultramáficas são muito importantes, pois a restrição espacial e temporal desses litotipos traz muitas informações geológicas fundamentais para o entendimento da evolução geotectônica de uma região. Além disso, sabe-se que rochas ultramáficas podem ser depósitos minerais de elementos metálicos, como Au, Ni, Cu, Cr e elementos do grupo da platina (EGP), o que faz dessas rochas importantes do ponto de vista econômico. Com isso, torna-se interessante o entendimento do comportamento desses elementos durante processos pós-magmáticos atuantes sobre essas rochas.

Neste trabalho são estudadas rochas ultramáficas/metaultramáficas da região de Catas Altas-MG, com o objetivo de caracterizar os aspectos mineralógicos e micromorfológicos de um perfil de solo in situ e da rocha sã na base deste perfil, a fim de compreender os processos pedogenéticos atuantes em rochas ultramáficas. Com isso, visa-se contribuir para um melhor entendimento dos processos de metamorfismo e pedogênese atuantes sobre essas. Tendo em vista que trabalhos que envolvam produtos de alteração pedogenética dessas litotipos são pouco encontrados na literatura.

## **LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO**

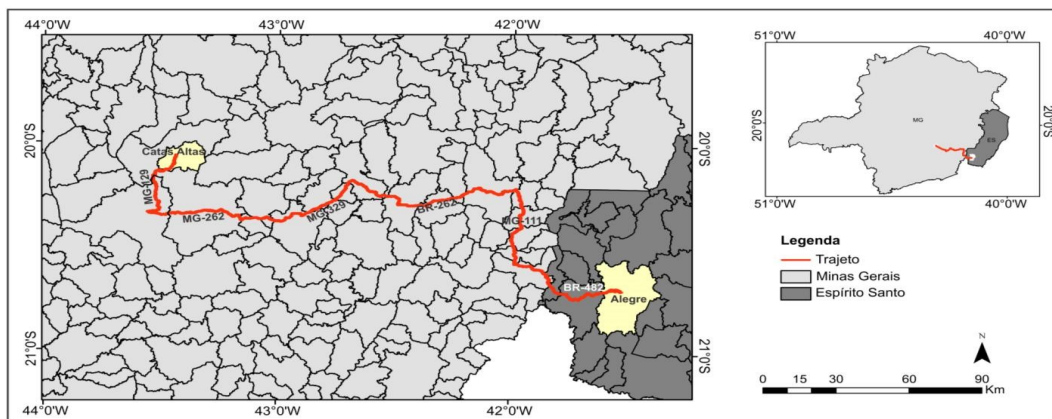
A área de estudo localiza-se na região sudeste do Brasil, porção centro-sudeste do estado de Minas Gerais, no município de Catas Altas. O acesso se dá, a partir do município de Alegre, pela rodovia BR-482 até o cruzamento com a rodovia MG-111, onde se deve virar à direita e seguir até a BR-262. Virando à esquerda na BR-262 no trevo de acesso a cidade de Ponte Nova, próximo ao Km 121, tem-se acesso à rodovia MG-329 que leva ao município de Ponte Nova. Após passar por este município segue-se pela MG-262 até Mariana e depois pela rodovia MG-129 até a cidade de Catas Altas onde se localiza a pedreira visitada. Esse percurso totaliza 390 km e a partir daí o acesso é realizado por estradas não pavimentadas que dão acesso a área estudada (Figura 1).

<sup>1</sup> Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo, CCENS, Alegre, ES

<sup>2</sup> Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG

<sup>3</sup> Serviço Geológico do Brasil, CPRM – Manaus, AM, Brasil

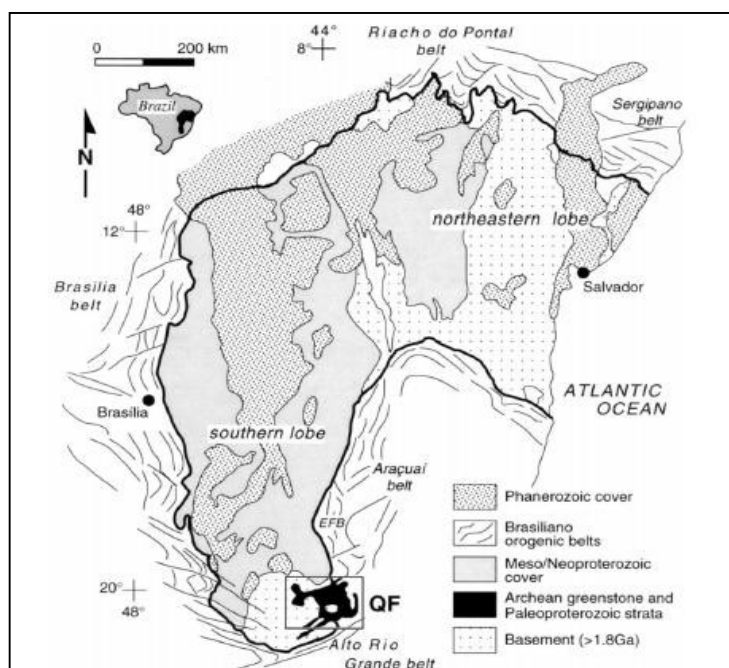
## Caracterização petrográfica e micromorfológica de perfil pedogenético em rochas ultramáficas/metaultramáficas na região de Catas Altas-MG



**Figura 1** - Mapa de localização e principais vias de acesso à área de estudo.  
Fonte: Autores.

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA/GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo está situada na região do Quadrilátero Ferrífero, que pertence a Província Geotectônica São Francisco (PGSF) (Baltazar & Raposo, 1993; Alkmim & Marshak, 1998). Essa província geológica corresponde ao Cráton do São Francisco e a rochas do embasamento cratônico retrabalhadas tectonicamente durante o Evento Brasiliano (0,6-0,5 Ga), que resultou na formação das faixas orogênicas brasileiras que delimitam este cráton (Baltazar & Raposo 1993; Uhlein et al., 1998; Alkmim & Marshak, 1998; Brueckner et al., 2000) (Figura 2).



**Figura 2** - Mapa regional do Cráton do São Francisco, mostrando a localização da porção sul e nordeste, as faixas que delimitam sua borda e o Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Alkmim & Marshak (1998).



As rochas ultramáficas/metaultramáficas estudadas neste trabalho são correlacionadas à sequência metavulcanossedimentar do Supergrupo Rio das Velhas. Essas rochas ocorrem intrudindo o embasamento cratônico formado pelos gnaisses do Complexo Santa Bárbara (Alkmim & Marshak, 1998).

## COMPLEXO SANTA BÁRBARA

O Complexo Santa Bárbara, assim designado por Baltazar & Raposo (1993), corresponde ao embasamento cristalino arqueano e encontra-se quase sempre envolvido por rochas relacionadas à sequência metavulcanossedimentar do Supergrupo Rio das Velhas (Baltazar & Raposo, 1993; Alkmim & Marshak, 1998).

Esse complexo é composto pelos gnaisses tonalíticos a trondhjemiticos que, geralmente, apresentam injeções de granitos. Além desses, observa-se a ocorrência de xenólitos de anfibolito e metadiorito no gnaiss (Baltazar & Raposo, 1993).

## SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS

Dorr et al. (1957) propôs a primeira definição para essa unidade nomeando-a como “Série Rio das Velhas” e a subdividindo nos grupos Nova Lima (inferior) e Maquiné (superior) (Pinto, 1996). Em seguida, o Grupo Maquiné foi subdividido nas formações Palmital (inferior) por O’Rourke (1958), e Casa Forte (superior) por Gair (1962) (apud Baltazar & Raposo, 1993; Pinto, 1996). Almeida (1976) e Schorscher (1976) caracterizaram a Série Rio das Velhas como um greenstone belt e, posteriormente, Schorscher (1979) a redefiniu como um Supergrupo e incluiu o Grupo Quebra Osso em sua base (apud Baltazar & Raposo, 1993).

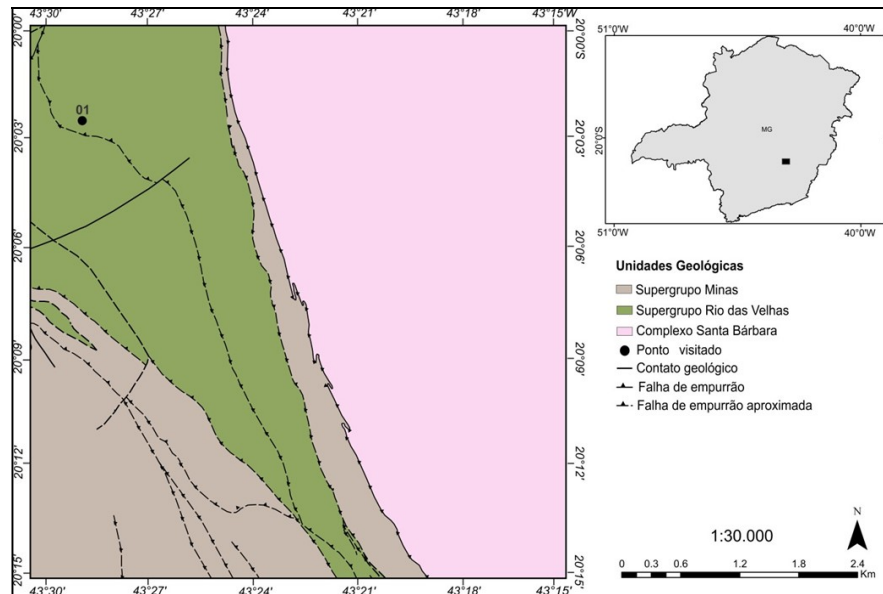
Baltazar & Raposo (1993) consideram este grupo como uma Subunidade Peridotítica do Grupo Nova Lima e correlacionam a esta subunidade, as rochas ultramáficas esteatitizadas e serpentinizadas, descritas na região.

O Grupo Nova Lima subdividi-se nas subunidades Peridotítica Quebra Osso e Vulcano-sedimentar. Na primeira, predominam as sequências metaultramáficas extrusivas, subaquáticas, associadas a derrames maciços, almofadados, brechados e com texturas do tipo spinifex, representadas por komatiitos peridotíticos com espessos horizontes cumuláticos metamorfisados na fácies xisto verde (Baltazar & Raposo, 1993; Pinto, 1996). A segunda é caracterizada pelo domínio de rochas metavulcânicas máficas a intermediárias, com estruturas de pillow preservadas, e com abundância de rochas metassedimentares químicas e detríticas intercaladas (Pinto, 1996).

O Grupo Maquiné é composto por uma associação metassedimentar siliciclástica (clástica não-marinha), com uma fácies litorânea e outra fluvial, respectivamente, Formação Palmital (inferior) constituída por filitos quartzosos, quartzitos homogêneos e lentes conglomeráticas, e Formação Casa Forte (superior) formada por lentes de conglomerado e quartzitos (Baltazar & Raposo, 1993). Esse grupo assenta-se sobre o Grupo Nova Lima de forma discordante.

As rochas desse supergrupo juntamente com as rochas plutônicas que intrudem a base deste e o embasamento cristalino, representam um clássico terreno granito-greenstone arqueano (Alkmim & Marshak, 1998).

## Caracterização petrográfica e micromorfológica de perfil pedogenético em rochas ultramáficas/metaultramáficas na região de Catas Altas-MG



**Figura 3** - Mapa geológico da região com o ponto visitado. Fonte: Modificado de Baltazar et al., 2005.

### INTEMPERISMO

Os processos intempéricos causam alterações físicas e químicas nas rochas e minerais na superfície terrestre em resposta às condições ambientes, controladas por agentes como a água e oxigênio que promovem reações químicas que alteram e transformam os minerais da rocha em minerais mais estáveis ao novo ambiente (Michelson, 2006).

Durante a ação dos processos pedogenéticos a composição química do solo é controlada em parte pela composição do material de origem, onde os solos mais desenvolvidos exibem mais intensamente os efeitos do intemperismo. Ao longo do tempo, a composição mineralógica do solo pode ser diferente daquela do material de origem. Isso, pois a alteração dos minerais primários é diferencial, ou seja, não ocorre ao mesmo tempo para todos os minerais, e os minerais secundários formados são diferentes dependendo dos minerais primários que lhes deram origem. Assim, o padrão e a intensidade do intemperismo são controlados, principalmente, pela natureza do mineral primário (Soares, 2013).

### METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, o trabalho se desenvolveu ao longo de 4 etapas, descritas a seguir:

Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica sobre a geologia regional da área, rochas ultramáficas/metaultramáficas, metassomatismo e alteração pedogenética através de artigos científicos referentes a esses assuntos e cartas geológicas disponíveis da região estudada. Os trabalhos de geologia regional são importantes ao entendimento do contexto geotectônico da área de estudo. Já os trabalhos referentes às rochas ultramáficas/metaultramáficas e metassomatismo estão relacionados à caracterização petrográfica dos litotipos, bem como aos processos geológicos de geração e modificação geoquímica dos mesmos. Os estudos de alteração pedogenética são importantes para o entendimento do comportamento dos minerais durante o processo de alteração pedogenética dos litotipos.

A etapa de campo ocorreu no dia 04 de fevereiro de 2015 e consistiu na visita a uma pedreira no município de Catas Altas-MG, onde foram coletadas amostras de rochas

ultramáficas/metaultramáficas e de seus níveis alterados pela pedogênese, das quais foram selecionadas, posteriormente, sete amostras para confecção de lâminas delgadas.

Ao longo do perfil amostrado na pedreira foram realizadas descrições petrográficas e micromorfológicas, coletas de amostras de rocha e de suas porções alteradas indeformadas. Para a coleta destas últimas utilizou-se saboneteiras para conservação da estrutura das amostras após serem retiradas do manto de alteração pedogenético.

As amostras coletadas foram analisadas macroscopicamente com o objetivo de selecionar as mais representativas dos litotipos observados em campo. Dessas foram selecionadas sete amostras para a confecção de lâminas delgadas, sendo: três de rochas e quatro de fragmentos alterados indeformados, confeccionadas no Laboratório de Laminação (Lamin) do DGEO/UFOP. Posteriormente, essas amostras foram descritas petrográfica e micromorfológicamente, em microscópio óptico, modelo Nikon, no Laboratório de Microscopia Óptica do Departamento de Geologia da UFES. A classificação de todas as rochas segue as recomendações de Fettes & Desmons (2007) e a análise micromorfológica foi apoiada nos estudos de Stoops (2003).

Os dados obtidos dos estudos petrográficos e micromorfológicos, foram tratados e interpretados. Os mapas e figuras foram confeccionados no software ArcGis versão 10.1 e tratados no software Corel DRAW X5.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As rochas ultramáficas e metaultramáficas estudadas ocorrem localmente como afloramentos de poucos metros, sem grande distribuição espacial e com muitas fraturas. Os contatos com as rochas encaixantes não foram observados nos afloramentos, provavelmente estes encontram-se obliterados pelo intemperismo. O manto de alteração sobrejacente a essas rochas apresentam poucos metros de espessura, com até 6 m de espessura no perfil estudado (Figura 4).

O ponto descrito situa-se em uma pedreira desativada no município de Catas Altas-MG. Nesse ponto foram descritos, da base para o topo, o metaperidotito, com ou sem textura blastocumulática de olivina e piroxênio pseudomórficos substituídos por minerais metamórficos e o serpentinito, bem como seus níveis alterados pelo intemperismo.

Macroscopicamente, o metaperidotito apresenta-se maciço, equigranular de granulação média, com coloração acinzentada escura a cinza esverdeada (Figura 5A) e possui variadas fraturas de diversas orientações preenchidas por serpentina (Figura 5B).

A rocha apresenta diferentes graus de serpentinização, identificada pela variação da abundância no volume de serpentina e das condições de preservação da textura cumulática do protólito peridotítico, caracterizada pela substituição de grãos de olivina e piroxênio por minerais metamórficos, como serpentina (Figuras 6A).

A composição mineralógica das rochas que apresentam textura blastocumulática é dada por serpentina, tremolita, clorita, carbonato, minerais opacos e antofilita. Os litotipos que exibem textura blastocumulática bem marcada apresentam, em média, 45% de serpentina e foram classificados como metaperidotito (Figura 6A). Naqueles com textura blastocumulática incipiente a quantidade de serpentina é bem maior (>75%), sendo classificados como serpentinito.

## Caracterização petrográfica e micromorfológica de perfil pedogenético em rochas ultramáficas/metaultramáficas na região de Catas Altas-MG



**Figura 4** - Pedreira desativada de metaperidotito. Fonte: Autores.

No metaperidotito, a serpentina ocorre subidioblástica, sob a forma lamelar (antigorita) e fibrosa (crisotila). Nas fraturas chega a até o tamanho de 7 mm. Pode intercrescer com tremolita, carbonato, antofilita e minerais opacos. A tremolita perfaz de 10 a 30% dos litotipos e ocorre como grãos subidioblásticos a xenoblásticos de até 0,9 mm que ocorre sob a forma prismática a acicular. Pode apresentar extinção ondulante e intercrescer com carbonato, minerais opacos e serpentina. A clorita perfaz até 20%, ocorre subidioblástica, sob a forma tabular, de 0,05 mm a 0,6 mm e com pleocroísmo verde-claro a amarelo-claro. A variação na birrefringência anômala de azul-arroxeadada para acastanhada indica mudança na razão Fe/Mg desse mineral. A primeira refere-se a Fe-Mg clorita e a última, a Mg-Fe clorita, sendo a Mg-Fe clorita a mais comum. Os demais minerais (carbonato, minerais opacos e antofilita) ocorrem como acessórios. Em geral são xenoblásticos a subidioblásticos e perfazem de 5% a <1% das rochas. Os minerais opacos ocorrem comumente sob a forma losangular e como identificado em campo parecem ser grãos de magnetita, pois exibem forte magnetismo contra o ímã de mão.

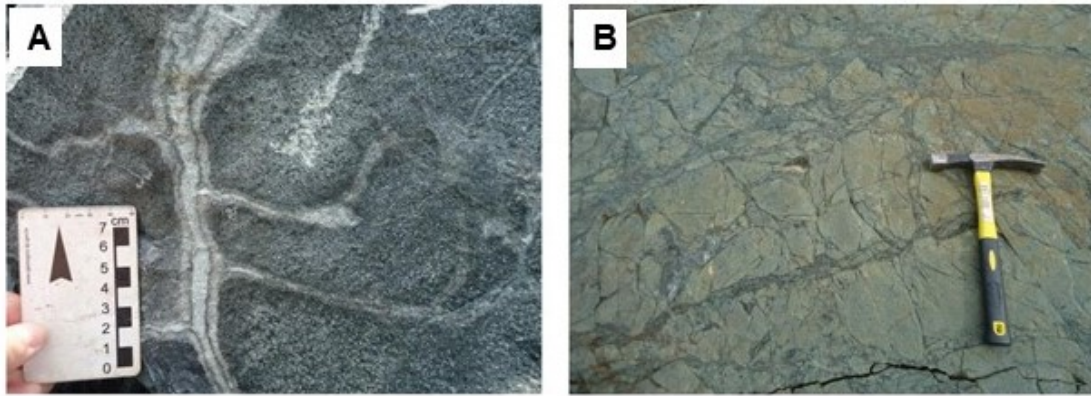
O serpentinito apresenta textura blastocumulática incipiente predominando a textura lepidoblástica formada pela orientação preferencial dos grãos de serpentina lamelar. A composição mineralógica é dada por serpentina, tremolita, talco, minerais opacos e carbonato. A serpentina perfaz de 78 a 80% da rocha e ocorre como grãos subidioblásticos de até 0,5 mm, sob as formas lamelar (antigorita) e fibrosa (crisotila). Pode intercrescer com tremolita, talco e carbonato. A tremolita perfaz de 15 a 20%, subidioblástica, sob a forma prismática, acicular, e às vezes losangular, com tamanhos de até 0,9 mm. Pode exibir extinção ondulante e textura decussada, e intercrescer com carbonato e minerais opacos. Os grãos losangulares comumente ocorrem associados à serpentina fibrosa preenchendo fraturas (Figura 6B). O talco perfaz de 2 a 5% da rocha, subidioblástico, sob a forma de palhetas tabulares finas de até 0,3 mm. Pode intercrescer com serpentina e tremolita. Os minerais opacos e o carbonato perfazem de 2 a <1% da rocha, são idioblásticos a xenoblásticos, de até 0,5 mm.

Tanto os litotipos com textura blastocumulática quanto aqueles isentos dela possuem inúmeras fraturas que podem chegar a até 13 mm de espessura e são preenchidas por grãos de serpentina fibrosa (crisotila) predominantemente, e lamelar (antigorita) de granulação fina a grossa. A tremolita encontrada é bem formada, com granulação variando de fina a grossa.

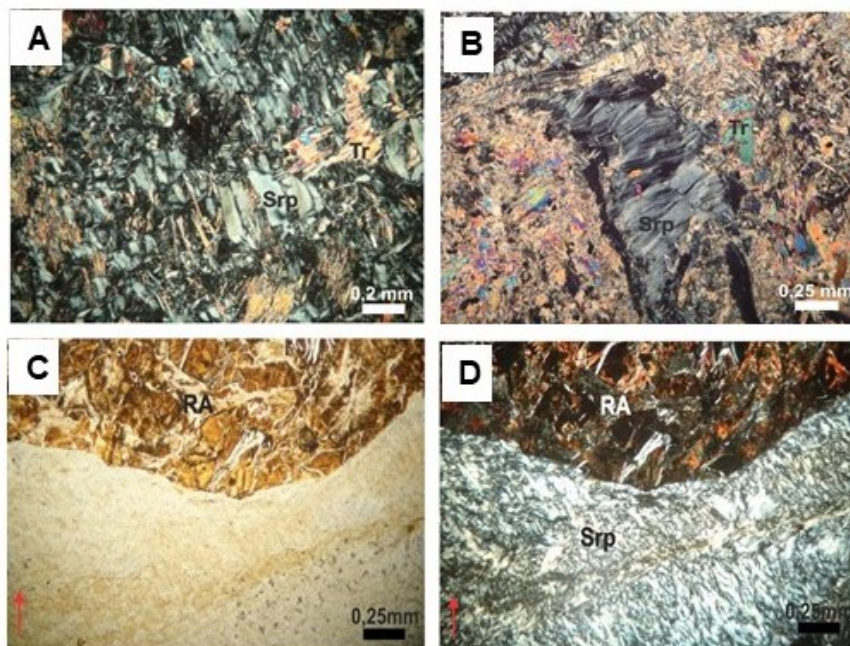
Nas porções em que a rocha exibe alteração incipiente verifica-se o acúmulo de um material de coloração amarronzada, possivelmente de composição ferruginosa que, em geral,



possui formas que variam de arredondada a irregular. Há porções em que a rocha ocorre mais intensamente alterada na parte superior, como observado no contato brusco entre a rocha e uma fratura preenchida por serpentina caracterizada por evidências incipientes de alteração (Figura 6C e 6D). Essa rocha possui coloração amarronzada, com agregados ferruginosos e grãos de serpentina fibrosa e lamelar preenchendo as fraturas. Em geral os grãos de serpentina lamelar apresentam maior grau de alteração que os fibrosos.



**Figura 5** - Fotos de amostras e fotomicrografias do ponto 01. A - Amostra de metaperidotito. B - Amostra de metaperidotito com fraturas preenchidas por serpentina. Fonte: Autores.



**Figura 6** - Fotos de amostras e fotomicrografias do ponto 01. A - Fotomicrografia de metaperidotito evidenciando a textura blastocumulática a LPX. B - Fotomicrografia de fratura preenchida por serpentina com cristais de tremolita bem formados a LPX. C - Fotomicrografia mostrando contato de porção alterada de metaperidotito de textura blastocumulática com fratura preenchida por serpentina a LPP. D - Fotomicrografia mostrando contato de porção alterada de metaperidotito de textura blastocumulática com fratura preenchida por serpentina fibrosa a LPX. LPX = Luz Polarizada Cruzada. Srp = Serpentina. Tr = Tremolita. RA = Rocha Alterada. Fonte: Autores.

## **Caracterização petrográfica e micromorfológica de perfil pedogenético em rochas ultramáficas/metaultramáficas na região de Catas Altas-MG**

Acima da rocha sã no perfil de alteração ocorrem as seguintes fácies de alteração descritas abaixo. As fácies que conservam estruturas da rocha fresca foram denominadas de isalteritas e a que não preserva nenhuma das estruturas da rocha de aloterita. A cor das fácies foi determinada com base na carta de solos de Munsell.

### **FÁCIES ISALTERITA PI**

A fácies isalterita PI, com cerca de 2 m de espessura, encontra-se acima da rocha. É friável e exibe textura em forma de blocos que foram preservados da rocha. Macroscopicamente, este nível apresenta cor amarelo alaranjado (7,5YR 7/8) (Figura 7A).

Microscopicamente, a fácies é constituída por agregados em forma de nódulos goethíticos que possivelmente tenham sido formados a partir de boxworks goethíticos gerados da rocha ultramáfica (metaperidotito) (Figura 7B). Esses podem apresentar tamanhos de até 6 mm, pequenos vazios de formato irregular, que exibem arranjo inter-agregados e intra-agregados. Em alguns desses nódulos são observadas fraturas finas de espessura de até 0,08 mm, comumente preenchidas por serpentina fibrosa primária levemente alterada, incolor a amarelo bem claro e birrefringência amarelo claro a cinza de 1ª ordem.

Verifica-se também em alguns nódulos e/ou vazios um mineral incolor a luz natural e amarelo claro à nicóis cruzados que parece ser tremolita. Foram identificados vazios entre os nódulos e os grãos de serpentina que preenchem as fraturas. Grãos de serpentina fibrosa bem alterada preenchem as fraturas que separam os nódulos goethíticos (Figura 7C). Estas exibem uma coloração que varia de amarelo claro a um tom bem ferruginoso (marrom) nas porções mais alteradas dos grãos e birrefringência cinza-amarelado a marrom (ferruginosa). Observa-se associado à serpentina um mineral incolor e com birrefringência em tom pálido e cores variadas, bem fino, que também parece ser serpentina, porém sob a forma maciça. Encontram-se também nesta fácies, grãos de minerais opacos sob a forma irregular, de até 1,4 mm, que ocorrem, principalmente, associados a grãos de serpentina preenchendo fraturas.

### **FÁCIES ISALTERITA PII**

A fácies isalterita PII, com cerca de 2 m de espessura, encontra-se acima da fácies PI. É friável e preserva textura em forma de blocos que são limitados por serpentina alterada, a cor macroscopicamente é amarelo alaranjado (7,5YR 7/8) (Figura 7D).

Microscopicamente, esta fácies é composta por agregados sob a forma de nódulos goethíticos formados a partir da destruição parcial dos minerais primários e, consequentemente, da estrutura do metaperidotito.

Nesta fácies ainda é possível observar algumas das estruturas da rocha primária, porém o grau de conservação é menor que na fácies abaixo desta. Isso, pois os vazios identificados, tanto nos nódulos como nas fraturas, não estão preenchidos por nenhum tipo de material, o que indica que os vazios tenham sido gerados pela lixiviação total de minerais da rocha. Esses nódulos exibem tamanhos variados de até 7 mm, vazios com arranjo intra-agregados, de formato irregular e comumente sem qualquer preenchimento.

As fraturas preservadas da rocha primária são preenchidas por serpentina fibrosa primária muito alterada, com coloração que varia de amarelo-amarronzada a ferruginosa e birrefringência anômala variando entre tons cinza-amarronzados e ferruginosos (Figura 7E). Ocorre associado aos nódulos e às fraturas preenchidas por serpentina, um mineral amarelo-claro a luz natural e de birrefringência alaranjada que parece ser tremolita, já que alguns desses apresentam formato losangular, semelhante ao observado em alguns grãos de tremolita junto à serpentina em fraturas da rocha primária. Além de vazios no interior dos agregados,

foram observados vazios inter-agregados, ou seja, entre os nódulos e/ou grãos de serpentina que preenchem as fraturas. Os nódulos goethíticos são individualizados uns dos outros por vazios não preenchidos e em poucos casos por serpentina alterada. Identifica-se nesta fácies, grãos de minerais opacos bastante alterados sob a forma irregular, de até 6 mm, que podem ocorrer associados aos nódulos goethíticos e aos grãos de serpentina que preenchem às fraturas da rocha primária.

#### FÁCIES ISALTERITA PIII

A fácies isalterita PIII, com cerca de 1 m de espessura, encontra-se acima da fácies PII. É pouco a levemente friável e tem um bandamento incipiente marcado pela alternância de bandas finas macroscopicamente de cor marrom (7,5YR 4/4) e bandas mais claras (7,5YR 7/8) (Figura 7F).

Microscopicamente, observa-se nesta fácies que a estrutura primária blastocumulática do metaperidotito encontra-se consideravelmente alterada pela remoção e/ou alteração de minerais como a serpentina, que preenchiam os vazios intra-agregados e inter-agregados, e fraturas primárias da rocha. Entretanto, verifica-se que essa alteração não foi capaz de destruir toda a estrutura original da rocha, sendo assim esta fácies ainda pode ser denominada de isalterita.

O volume de vazios nesta fácies é superior ao da fácies abaixo desta e estes ocorrem tanto nos nódulos goethíticos como nas fraturas. Em termos gerais, os vazios não são preenchidos por nenhum tipo de material, o que indica que tenham sido gerados pela lixiviação total de minerais da rocha. A fácies é constituída por agregados sob a forma de nódulos goethíticos formados da alteração parcial e/ou total dos minerais primários. Estes possuem tamanhos de até 15 mm, vazios com arranjo intra-agregados, de formato irregular e sem e/ou com preenchimento. Estes podem estar preenchidos por cristais de gibsita mal formados, sob a forma granular, de até 0,04 mm. A forma dos cristais de gibsita tem relação com a reduzida quantidade de material primário nesta fácies, o que indica que estas foram cristalizadas nos vazios por precipitação. Observa-se que as fraturas preservadas da rocha são preenchidas por um material muito fino (criptocristalino), de coloração acinzentada, que parece ser um argilomineral. Este forma-se da alteração da serpentina e, provavelmente, seja esmectita, pois esta se forma a partir da alteração da olivina (Figura 7G).

Os nódulos goethíticos separam-se uns dos outros pelos vazios. Os grãos de minerais opacos ocorrem muito alterados, sob a forma irregular, de até 7 mm e com pequenos vazios intragrãos. Podem ocorrer associados, tanto aos nódulos goethíticos como aos demais materiais que preenchem as fraturas e vazios.

#### FÁCIES ALOTERITA PIV

A fácies aloterita PIV, com cerca de 1 m de espessura, encontra-se acima da fácies isalterita PIII. É pouco friável e exibe textura maciça macroscopicamente marrom (7,5YR 4/3) (Figura 7H).

Esta fácies exibe o maior grau de alteração micromorfológica dentre as fácies descritas, pois não preserva nenhuma das estruturas originais do metaperidotito, podendo ser denominada de aloterita. Observa-se que esta apresenta uma estrutura bastante orientada horizontalmente, o que dá a essa fácies um aspecto bandado.

A composição é dada predominantemente por agregados ferruginosos, de coloração marrom bem escuro, granulação muito fina e com vazios de tamanhos variados, em geral, sem preenchimento. Foi observado em alguns destes vazios, grãos de um mineral incolor com birrefringência que varia de amarelo claro a cinza claro, sob a forma granular, de até 0,3 mm e



## **Caracterização petrográfica e micromorfológica de perfil pedogenético em rochas ultramáficas/metaultramáficas na região de Catas Altas-MG**

que possui sinal óptico uniaxial positivo. As características apresentadas por este mineral indicam que seja o quartzo (Figura 8A), o que é estranho, pois a rocha não possui quartzo em sua composição. A possível explicação para a presença deste mineral nos vazios dessa fácies é que o mesmo tenha vindo de fora da rocha, por ação de processos biológicos, o que pode ser inferido, pois observa-se nesta fácies vazios contínuos com a forma de túneis sem evidências de que tenham sido formados por processo pedogenético (Figura 8B).

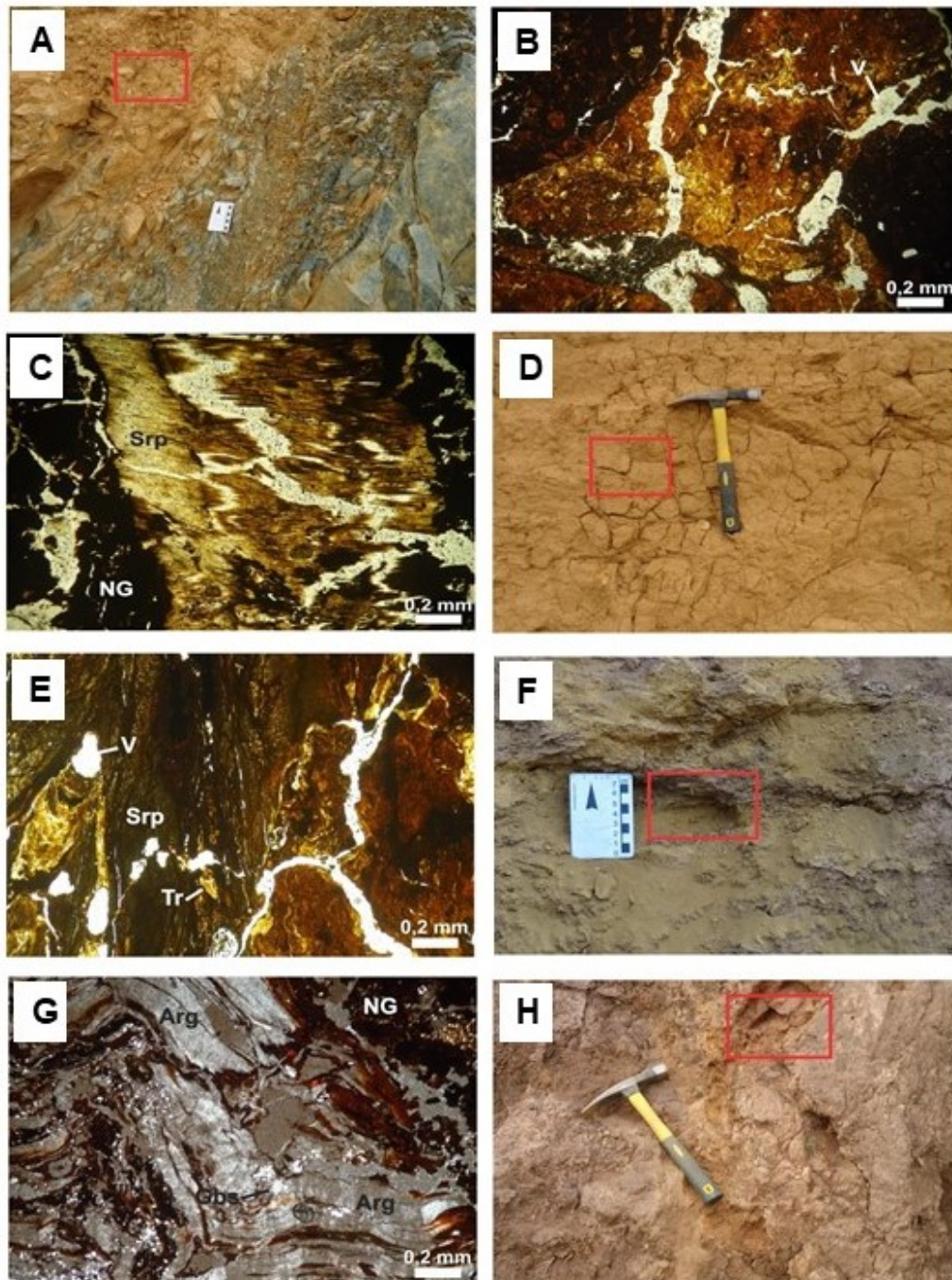
Em termos gerais, os vazios são inter-agregados e pequenos, podem ser preenchidos ou não, por cristais de gibsita mal formados, sob a forma granular, de até 0,03 mm. Os cristais de gibsita podem preencher total ou parcialmente os vazios (Figura 8C), podendo ocorrer goethita na porção central dos vazios que estão totalmente preenchidos. O fato de parte dos cristais de gibsita preencher apenas a borda dos vazios indica que estes foram cristalizados por precipitação.

### **ASPECTOS PETROGRÁFICOS E METAMÓRFICOS**

Os litotipos ultramáficos descritos foram correlacionados ao Grupo Quebra Osso devido às características petrográficas e o registro de ocorrência dessa unidade na região.

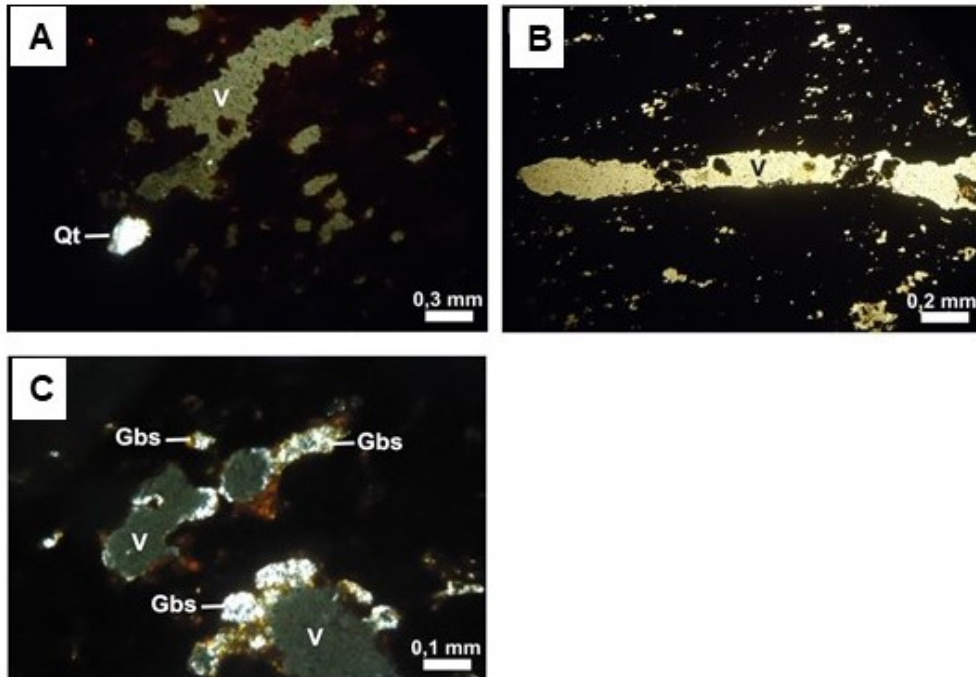
As metaultramáficas foram classificadas como metaperidotito e serpentinito. As paragêneses minerais encontradas frequentemente são dadas por serpentina (fibrosa e lamelar) ou clorita  $\pm$  talco  $\pm$  serpentina, que sugerem metamorfismo sob condições semelhantes à fácies xisto-verde. O estudo das feições texturais dessas rochas indicam que houve diferenças na eficiência do processo metamórfico, pois enquanto em alguns serpentinitos e no metaperidotito verificou-se a presença de textura ígnea cumulática preservada em outros litotipos a mesma não era observada. Isso pode estar relacionado às fraturas encontradas nessas rochas, que estão preenchidas por minerais como serpentina, talco e anfibólio. Essas estruturas podem ter sido os grandes responsáveis pelo aporte fluído que propiciou as transformações metamórficas. Com isso, podem ter interferido na intensidade do processo metamórfico.

A característica geoquímica dessas rochas descrita pela literatura, associada a não observação de foliação nas rochas ultramáficas e a interpretação de que o fraturamento pode ter favorecido o desenvolvimento metamórfico podem auxiliar no entendimento das transformações minerais ocorridas nessas rochas, bem como na caracterização da natureza do processo. Pode-se sugerir que o metamorfismo é resultante do fraturamento hidráulico dessas rochas durante entrada de fluido hidrotermal, que pode ser produto da interação composicional do protólito da rocha ultramáfica quando o mesmo intrudiu o embasamento gnáissico. Isso justificaria as mudanças mineralógicas e a parcial preservação dessas texturas.



**Figura 7** - Fotos de amostras e fotomicrografias de níveis alterados do ponto 01. A - Afloramento evidenciando em retângulo vermelho local de coleta de amostra na fácies PI. B - Fotomicrografia mostrando nódulos goethíticos e vazios na fácies PI a LPP. C - Fotomicrografia evidenciando serpentina alterada e nódulos goethíticos na fácies PI a LPP. D - Afloramento evidenciando em retângulo vermelho local de coleta de amostra na fácies PII. E - Fotomicrografia evidenciando serpentina muito alterada, tremolita e vazios na fácies PII a LPP. F - Afloramento fácies PIII com área em vermelho indicando local da coleta de amostra. G - Fotomicrografia evidenciando argilomineral substituindo serpentina, cristais de gibsita e nódulos goethíticos na fácies PIII a LPX. H - Afloramento fácies PIV com área em vermelho mostrando local da coleta de amostra. LPP = Luz Polarizada Plana. LPX = Luz Polarizada Cruzada. Gbs = Gibsita. Srp = Serpentina. Arg = Argilomineral. NG = Nódulos Goethíticos. V = Vazio. Fonte: Autores.

**Caracterização petrográfica e micromorfológica de perfil pedogenético em rochas ultramáficas/metaultramáficas na região de Catas Altas-MG**



**Figura 8** - A - Fotomicrografia da fácies PIV mostrando grão de quartzo e vazios a LPX. B - Fotomicrografia evidenciando vazios em forma túnel na fácies PIV a LPP. C - Fotomicrografia evidenciando cristais de gibsita preenchendo total e parcialmente vazios na fácies PIV a LPX. LPP = Luz Polarizada Plana. LPX = Luz Polarizada Cruzada. Gbs = Gibsita. V = Vazio. Qt= Quartzo. Fonte: Autores.

Verifica-se com base na análise micromorfológica que a evolução pedogenética do perfil de alteração, da base para o topo, varia de incipiente a pouco desenvolvida. Esse desenvolvimento é evidenciado pela formação dos nódulos goethíticos que predominam nos níveis mais alterados. Estes nódulos podem estar sendo acumulados em oxi-hidróxidos de Fe e Al pela lixiviação dos poucos elementos que ainda existem nestes níveis, pois a coloração nestas porções é bem mais ferruginosa e assemelha-se ao início de um processo de laterização bem incipiente.

Foram identificados nas porções mais desenvolvidas do perfil de alteração a presença de grãos de quartzo. Entretanto, as rochas das quais estes níveis alterados formaram-se foram identificadas como metaultramáficas, o que permitiu indicar que esses níveis do perfil podem ter recebido alguma contribuição da rocha gnáissica encaixante. Isso, pois Baltazar & Raposo (1993) relataram que o contato entre a rocha metaultramáfica e o gnaíse pode ser observado na pedreira onde essas amostras foram coletadas. Tal contribuição poderia se dar por agentes biológicos.

## **CONCLUSÃO**

As rochas metaultramáficas descritas no presente trabalho foram geradas por um processo metamórfico metassomático oriundo da interação do protólito intrusivo ígneo desses litotipos com a encaixante gnáissica do Complexo Santa Bárbara.

Os litotipos encontrados foram o serpentinito e o metaperidotito. Esse último foi considerado a rocha mais próxima textural e mineralogicamente do protólito ígneo. O estudo petrográfico, textural e químico permitiu identificar o serpentinito como o litotipo mais



obliterado pelo processo metamórfico. Também se verificou que a intensidade do metamorfismo pode estar diretamente relacionada às fraturas encontradas nas metaultramáficas, o que liga esse processo ao fraturamento hidráulico da rocha.

A variação mineralógica e micromorfológica observada ao longo do perfil indicam um grau de desenvolvimento intermediário do solo e a ocorrência de minerais secundários como goethita e gibsita no topo do perfil sugere que o processo pedogenético concentrou elementos pouco móveis como Al e Fe. Dada a importância das rochas ultramáficas e os resultados obtidos no perfil estudado verifica-se que o processo pedogenético pode ter levado ao enriquecimento de outros elementos como Ni, Au, Ti, Cr e platinoídeos que são pouco móveis, abundantes nestas rochas e valorizados economicamente, o que sugere a continuação desse estudo para análise geoquímica a fim de verificar esse possível enriquecimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM F.F., MARSHAK S. **Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero.** Precambrian Research, 90:29-58. 1998.

ALMEIDA F.F.M. DE. **Estruturas do Pré-Cambriano Inferior Brasileiro.** In: Congr. Bras. Geol., 29, Ouro Preto, Anais, 1:201-202. 1976.

BALTAZAR O.F., RAPOSO F.O. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.** Folha Mariana (SF.23-X-B-I). Estado de Minas Gerais. Escala: 1:100.000. CPRM, 183p. 1993.

BALTAZAR, O.F.; BAARS F.J.; LOBATO, L.M.; REIS, L.B.; ACHTSCHIN, A.B.; BERNI, G.V.; SILVEIRA, V.D. **Mapa Geológico Catas Altas na Escala 1:50.000 com Nota Explicativa.** In: Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com nota explicativa. CODEMIG. Belo Horizonte. 2005.

BRUECKNER H. K., CUNNINGHAM D., ALKMIN F. F., MARSHAK S. **Tectonic implications of Precambrian Sm–Nd dates from the southern São Francisco craton and adjacent Araçuaí and Ribeira belts, Brazil.** Precambrian Research, 99: 255–269. 2000.

DORR J.V.N., GAIR J.E., POMERENE J.G., RYNEARSON G.A. **Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero.** Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, Boletim 81, 31p. 1957.

FETTES D. & DESMONS J. (Eds.) **Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks.** Cambridge University Press, Cambridge, 244 p. 2007.

MICHELON, C. R. **Balanço químico em seis conjuntos solo-saprolito do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. RS. p: 68. 2006.

PINTO C.P. **Projeto Rio das Velhas: texto explicativo.** Belo Horizonte, CPRM, 122p. Convênio DNPM/CPRM. 1996.

SCHORSCHER H.D. **Polimetamorfismo do Pré-Cambriano na Região de Itabira, Minas**

**Caracterização petrográfica e micromorfológica de perfil pedogenético em rochas ultramáficas/metaultramáficas na região de Catas Altas-MG**

**Gerais.** In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Ouro Preto, Anais, 194-95. 1976.

**SCHORSCHER J.H.D. Evolução geotectônica e petrogenética do embasamento arqueano do Quadrilátero Ferrífero.** Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, 51(4):767-768. 1979.

**SOARES, C. C. V. Gênese e evolução mineralógica, micromorfológica e geoquímica da bauxita de Espera Feliz – MG.** Dissertação (Mestrado), Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto. v. 71, n. 311, 82f.2013.

**STOOPS, G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections.** Soil Sci. Soc. Am., Madison. 181p. 2003.

**UHLEIN, A.; TROMPETTE, R.; EGYDIO-SILVA, M. Proterozoic rifting and closure, SE border of the Sao Francisco Craton, Brazil.** Journal of South American Earth Sciences, 11 (2): 191-203. 1998.







## Capítulo 8

### Identificação de materiais de preenchimento de estruturas geológicas por difratometria de raios-x

*Thais Ruy Aiolfi<sup>1</sup>, Mirna Aparecida Neves<sup>1</sup>, Salomão Silva Calegari<sup>1</sup>, Caroline Cibebe Vieira Soares<sup>1</sup>, Rodson de Abreu Marques<sup>1</sup>*

## INTRODUÇÃO

A técnica de difração de raio-X (DRX) é uma ferramenta útil para identificação e quantificação de minerais presentes em materiais argilosos e em solos (ŚRODÓN, et al., 2001; SHRIVASTAVA, et al., 2009; HUGHES, et al., 1994; HILLIER, 2003), bem como em rochas que possuem minerais de difícil identificação óptica (BUNACIU, et al., 2015; ŚRODÓN, et al., 2001). Esta técnica pode ser usada para determinação de estruturas cristalinas, análises quantitativas (análises modais) e análises texturais, como orientação de grãos em amostras policristalinas (BRINDLEY & BROWN, 1980 apud BUNACIU, et al., 2015), resistência ao estresse, e qualquer outra variável relacionada à estrutura básica da amostra (BUNACIU, et al., 2015). Cada tipo de material cristalino é definido por sua estrutura cristalina, que possui um padrão único de difração de raio-X, possibilitando a identificação rápida dos minerais presentes nas amostras de rocha ou solo (BUNACIU, et al., 2015).

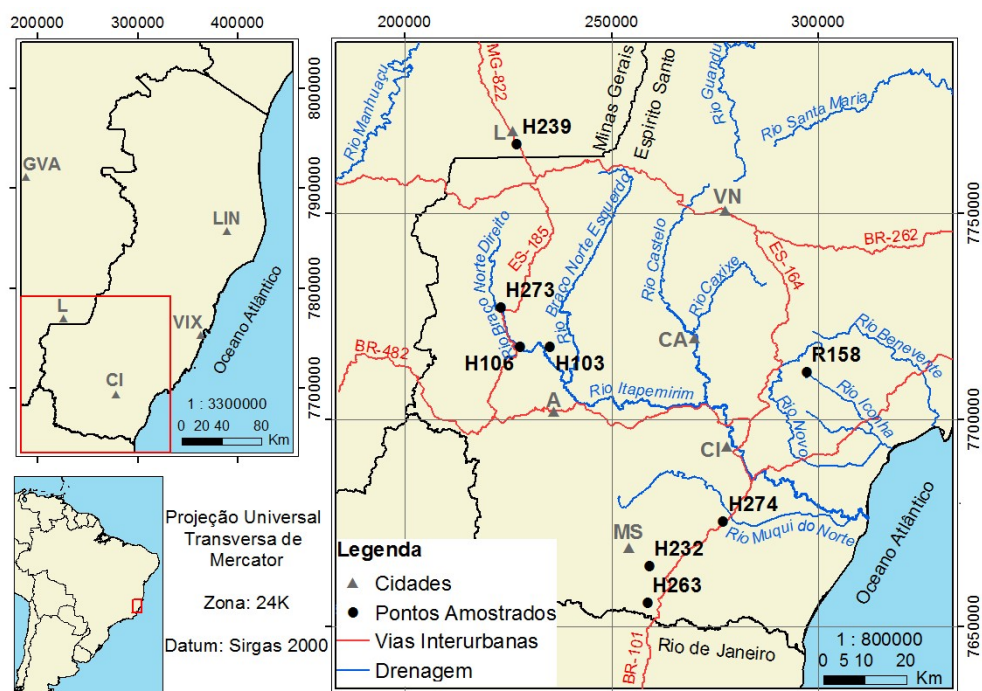
A pesquisa aqui apresentada envolveu a descrição das fases cristalinas dos materiais de preenchimento de estruturas rúpteis por DRX. Os materiais estudados ocorrem em afloramentos descritos anteriormente por Calegari et al. (2016) no sul do Estado do Espírito Santo. Estes autores identificaram materiais lateríticos e argilominerais que preenchem ou recobrem superfícies planares de juntas e espelhos de falha. A depender do tipo mineral presente, métodos de datação poderão ser aplicados futuramente, permitindo desvendar parte da evolução geológica pós-mesozoica da região. Porém, em virtude de sua fina granulação, a composição mineralógica destes materiais não pode ser determinada opticamente, motivo pelo qual a técnica de DRX foi aplicada. Os resultados obtidos são relevantes e as implicações relacionadas à evolução geológica regional serão em breve publicadas em artigo científico.

## LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área de estudo está localizada no Sul do Estado do Espírito Santo, compreendendo os municípios de Alegre, Ibitirama, Mimoso do Sul, Atílio Vivácqua e Vargem Alta, além do município de Lajinha, na região sudeste de Minas Gerais (Figura 1).

<sup>1</sup> Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo, CCENS, Alegre, ES

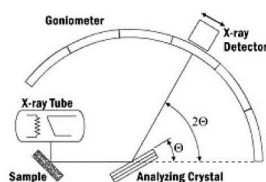
# Identificação de materiais de preenchimento de estruturas geológicas por difratometria de raios-x



**Figura 1** - Localização da área de estudo, com a representação dos pontos amostrados e acesso principal, a partir de rodovias federais e estaduais. Cidades: A = Alegre, CA = Castelo, CI = Cachoeiro de Itapemirim, GVA = Governador Valadares, L = Lajinha, LIN = Linhares, MS = Mimoso do Sul, VN = Venda Nova do Imigrante, VIX = Vitória (dados vetoriais do GEOBASES, 2002). Fonte: Autores.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A técnica de difração de raio-X (DRX) se baseia na incidência de raio-X monocromático em uma amostra cristalina (BUNACIU et al., 2015; KHULBE et al., 2010). Os raios são gerados por um tubo de raio catódico, com mira concentrada e direcionada para a amostra (Figura 2). Essa interação produz interferências construtivas, ou raios difratados, que são detectados, processados e contados. A amostra é analisada sob vários ângulos  $2\theta$ , de forma que todas as direções de difração sejam alcançadas. O instrumento que mantém os ângulos e rotaciona a amostra é chamado goniômetro. Posteriormente, os picos captados são convertidos em espaços interplanares (d-spacings), que permitem a identificação do composto mineral. Os espaços interplanares constituem a distância regular entre os átomos dos sólidos cristalinos. Assim, sólidos com a mesma composição química, mas diferentes fases minerais (diferentes estruturas cristalinas), podem ser identificadas pela sua configuração de espaços interplanares, que funciona como uma “impressão digital” desse sólido.



**Figura 2** - Diagrama Esquemático de um sistema difratômetro. Fonte: Bunaciu et al., 2015.

Em meio às vantagens da utilização do método, estão a rapidez de identificação de um mineral, a determinação mineral inequívoca na maioria dos casos e afácil preparação das amostras (BUNACIU, et al., 2015). Suas limitações e dificuldades estão na sobreposição de linhas quando muitos componentes estão presentes e diagramas mal definidos decorrentes de baixa cristalinidade ou tamanho pequeno dos cristais (BRINDLEY, 1952).

## PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

A preparação da amostra é uma das etapas mais importantes para a análise de DRX (CHIPERA & BISH, 2013), principalmente quando se trata de amostras de solos e argilas que contém coloides e materiais orgânicos. Além de remover esses materiais, a preparação visa à obtenção de um tamanho mais adequado para as partículas (BUNACIU, et al., 2015).

Para análises qualitativas de componentes minerais, a amostra deve passar pela peneira de 325 mesh (45 $\mu$ m), granulação que pode ser obtida através de moagem mecânica ou manual (BUNACIU, et al., 2015). Vale ressaltar que a moagem excessiva pode resultar na mudança de fase ou na formação de uma camada amorfa sobre os grãos (BUNACIU, et al., 2015; SHRIVASTAVA, et al., 2009). Shrivastava (2009) ainda indica a moagem úmida, com água ou propanol. A remoção de material orgânico, quando necessária, pode ser feita com agente oxidante forte, como o hipoclorito de sódio (NaClO), porém esse tratamento pode oxidar o ferro ferroso na folha octaédrica, causando alterações na difração pelos minerais de argila (SHRIVASTAVA, 2009).

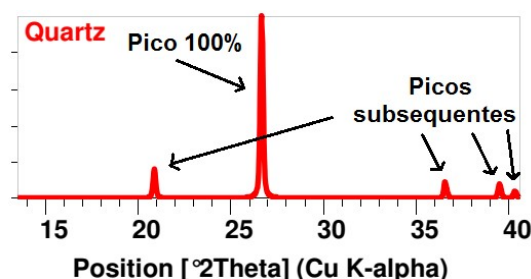
O leitor poderá obter maiores detalhes sobre a preparação de amostras mais à frente, no item que descreve os métodos empregados neste trabalho.

## INTERPRETAÇÃO QUALITATIVA DOS DADOS

Os difratogramas podem ser interpretados tanto em planilha eletrônica quanto em programas desenvolvidos especificamente para essa finalidade, porém a utilização de um banco de dados com as características cristalográficas e uma lista de picos de difração de cada mineral é imprescindível. É necessário que se tenha uma ideia do conteúdo mineral presente na amostra, visto que existe uma gama de minerais diferentes que apresentam picos semelhantes.

Inicialmente, é necessário fazer o tratamento de background do difratograma, tornando o ruído o menor possível. A determinação dos picos que serão analisados pode ser feita manualmente ou, caso o programa permita, automaticamente. Todos os picos de maior relevância devem ser analisados, independentemente da sua intensidade relativa (contagens/segundo).

A determinação da composição mineral em um difratograma deve ser feita da seguinte forma: para que um mineral seja identificado, o pico de 100% de intensidade deste mineral deve estar presente na posição  $2\theta$  característica do mesmo, e deve haver repetição de pelo menos dois picos de menor intensidade, nas suas respectivas posições  $2\theta$  (Figura 3). É preciso ressaltar que o pico de 100% do mineral deve apresentar maior intensidade relativa que os picos subsequentes. Pode haver um pequenodesvio entre o ângulo medido no difratograma e o ângulo registrado no banco de dados como característico de determinado mineral. Esse desvio pode ser considerado como um erro experimental aceitável desde que não exceda dois décimos do  $2\theta$ .



**Figura 3** - Exemplo do padrão de difração do quartzo, onde aparece o pico de 100% e os picos de menor intensidade, nas respectivas posições  $2\theta$  do mineral. Fonte: Modificado de Speckman (2013).

Dependendo dos minerais presentes na amostra, pode ocorrer a sobreposição de picos, o que dificulta a interpretação do difratograma. Assim, os picos de menor intensidade de um determinado mineral podem apresentar maior intensidade relativa quando são sobrepostos a picos de maior intensidade de outro mineral. Nestes casos, é necessária maior atenção na interpretação desses difratogramas.

Vale ressaltar que a intensidade dos picos não está relacionada à quantidade do mineral na amostra. Os padrões de determinado mineral podem ser mais intensos por difratar os raios-X com maior eficiência.

O difratograma só estará totalmente interpretado quando todos os picos estiverem identificados como pertencentes a algum mineral.

Maiores informações sobre a interpretação qualitativa (e quantitativa) de dados difratométricos podem ser encontradas em Speckman (2013).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho envolveu uma etapa pré-campo, dedicada ao levantamento de mapas e material bibliográfico preexistente. Também foi realizada a seleção dos afloramentos que contém estruturas rúpteis anteriormente descritos por Calejari et al. (2016).

Na etapa de campo o material de preenchimento foi coletado em 8 afloramentos (Figura 1). A coleta foi feita com o auxílio de pincel de cerdas finas para a limpeza do plano estrutural, martelo estratigráfico e ponteira para a amostragem precisa do material de preenchimento. As amostras foram armazenadas em sacos plásticos com a identificação da amostra. Todas as amostras foram descritas a olho nu, com lupa de bolso e com lupa binocular. Esse procedimento é fundamental para guiar a interpretação correta dos difratogramas, pois é necessário que se tenha alguma ideia da composição do material a ser analisado por DRX.

A etapa laboratorial envolveu o teste de reação com peróxido de hidrogênio nas amostras que continham materiais de preenchimento de cor preta, e na preparação das amostras para a análise por DRX, utilizando: estilete, placa de petri, pincel de cerdas finas, almofariz de ágata, pipetas descartáveis, peneira de 325 mesh, acetona PA (99,5%), microtubos descartáveis, estufa e lavadora ultrassônica. Todo o material foi limpo e descontaminado antes e depois da preparação de cada amostra. A peneira foi lavada com água na lavadora ultrassônica por 60 minutos. O pincel foi lavado cuidadosamente com detergente neutro diluído e água corrente. Após a lavagem, os materiais foram secos na estufa com temperatura de cerca de 50°C. O conjunto restante do material reutilizável foi lavado com água corrente e detergente neutro diluído, para posteriormente ser secado com acetona PA (99,5%).

O material de preenchimento analisado foi coletado por meio de raspagem com o auxílio do estilete e acondicionado em placa de petri. Posteriormente, esse material foi

cominuído no almofariz de ágata e, com o auxílio de uma pipeta descartável, foram pingadas 3 a 4 gotas de acetona PA (99,5%) afim de retirar toda a sua umidade. O material foi cominuído até atingir a granulometria necessária para passagem na peneira de 325 mesh. Para o peneiramento foi utilizado apenas o pincel de cerdas finas para facilitar a passagem do material, que deve ser utilizado cuidadosamente em movimentos de vai e vem e na posição sub-horizontal, contra a malha da peneira, mas sem pressioná-la.

Após a obtenção do material peneirado, os mesmos foram acondicionados em microtubos descartáveis rotulados para envio ao laboratório. Os difratogramas foram gerados no Laboratório Multiusuário de Difração de Raios-X do LabPetro no Centro de Ciências Exatas da Universidade Federal do Espírito Santo, utilizando um goniômetro Bruker, com tubos de raio-X com anodo de cobre, radiação K-alfa com comprimento de onda de 1,45418 Angstrom (Å), em velocidade de varredura  $0,3^\circ 2\theta/\text{min}$  e com  $2\theta$  variando de  $5^\circ$  a  $75^\circ$ . Os difratogramas gerados foram, então, analisados e interpretados com auxílio do software X'Pert HighScore Plus 2.0.1 e banco de dados acoplado.

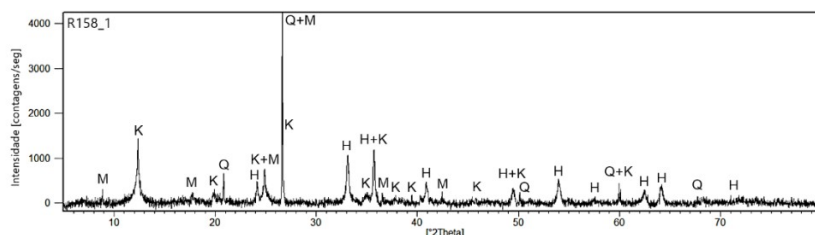
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### PONTO R158

Neste ponto, ocorre um gnaiss alterado composto de quartzo, mica branca, e argilas vermelha, branca e alaranjada, e é afetado por falhas e juntas. Trata-se da encaixante de um veio de quartzoque apresenta mica branca, argila branca, e um material manganêsífero de hábito botrioidal e dendrítico, que efervesce quando em contato com o peróxido de hidrogênio. Na parte inferior do veio de quartzo existe uma junta preenchida com grande quantidade da argila branca, e quartzo. O dique é de diabásio, com quartzo, biotita, pequenos grãos de um mineral preto estriado e argilas branca e alaranjada; também apresenta falhas e juntas.

Para a análise por DRX, foram amostrados: o material do espelho de falha do gnaiss (R158\_1); o material preto encontrado no veio de quartzo (R158\_2); o material argiloso branco encontrado na junta da parte inferior do veio de quartzo (R158\_3) e o dique alterado (R158\_4).

O material do espelho de falha do gnaiss (R158\_1) possui quartzo, muscovita, hematita e caulinita (Figura 4). O quartzo apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 26,6^\circ$  e a muscovita apresenta dois picos de maior intensidade em  $2\theta = 26,6^\circ$ , assim como o quartzo, e em  $2\theta = 8,8^\circ$ . A hematita [ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ] (VELDE e MEUNIER, 2008) apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 33^\circ$  e, a partir da análise do material macroscópico, é caracterizada como o material de fração argila de coloração avermelhada que dá a cor característica da rocha. A caulinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ] (VELDE e MEUNIER, 2008) apresenta dois picos de maior intensidade, em  $2\theta = 12,3^\circ$  e  $24,8^\circ$ , e é o único argilomineral encontrado na amostra, correspondente à argila branca identificada na análise macroscópica.

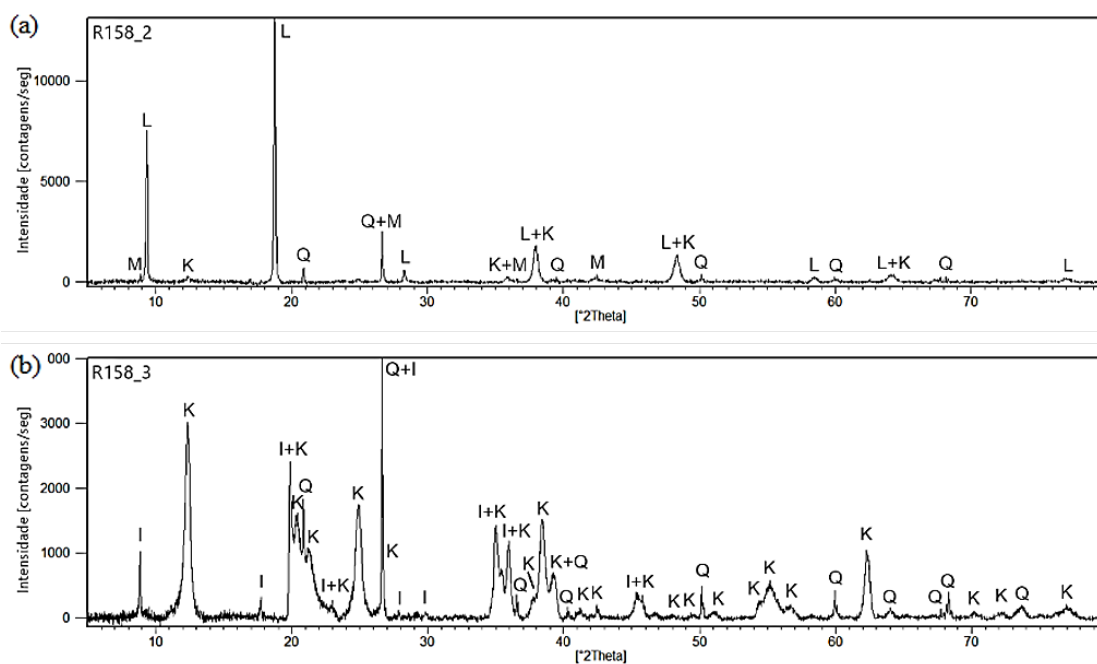


**Figura 4** - Difratograma do material do espelho de falha do gnaiss, correspondente à amostra R158\_1 (H = Hematita; K = Caulinita; M = Muscovita; Q = Quartzo). Fonte: Autores.

## Identificação de materiais de preenchimento de estruturas geológicas por difratometria de raios-x

A amostra R158\_2 possui quartzo, muscovita, caulinita e litioforita (Figura 5a). Apesar de coletado e preparado somente o material preto para a análise difratométrica, ainda aparecem no difratograma o quartzo, com o pico de maior intensidade em  $2\theta = 26,6^\circ$  e a muscovita com dois picos de maior intensidade, em  $2\theta = 8,8^\circ$  e  $26,6^\circ$ . A caulinita apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 12,3^\circ$ , identificada macroscopicamente como o material argiloso branco. O material preto de hábito botrioidal e dendrítico, que ocorre entre os grãos de quartzo e que reage com peróxido de hidrogênio é a litioforita  $[(Al,Li)Mn^{4+}_2O_2(OH)_2]$  (ANTHONY et al., 2001), com o pico de maior intensidade em  $2\theta = 18,7^\circ$ .

O material argiloso que preenche a junta (R158\_3) possui quartzo, caulinita e ilita (Figura 5b). O quartzo apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 26,6^\circ$ , e é diagnosticado em amostra de mão. A caulinita, é um dos dois argilominerais encontrados no difratograma, com o pico de maior intensidade em  $2\theta = 12,3^\circ$ , e é diagnosticado em amostra de mão como a argila branca, encontrada em grande quantidade preenchendo a junta. O outro argilomineral é a ilita  $[K_{x+y}(Al, Fe^{3+}_{2-y})MgySi_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2]$  (VELDE e MEUNIER, 2008), no pico de maior intensidade em  $2\theta = 26,6^\circ$ , correspondente ao pico de 100% do quartzo. Macroscopicamente, esse mineral não foi distinguido, porém, por apresentar variação de cor parecida com a da caulinita, esses dois argilominerais podem estar juntos no material argiloso branco.

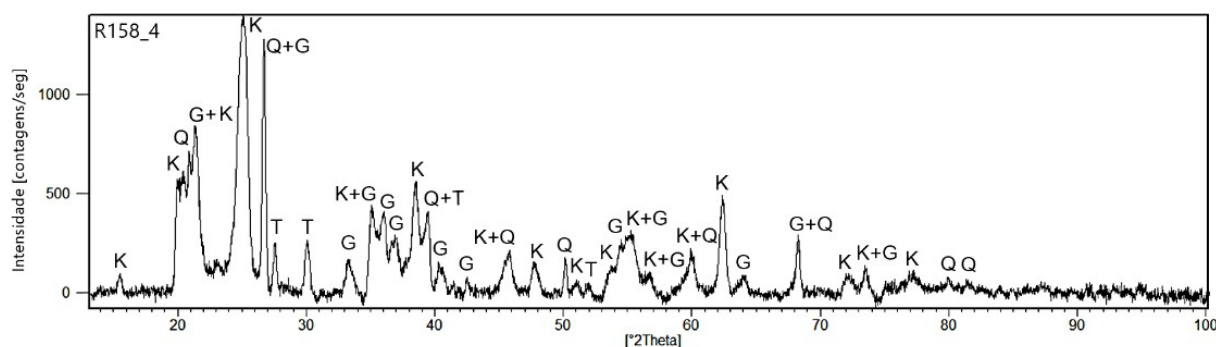


**Figura 5** - Difratogramas correspondentes dos materiais amostrados no veio de quartzo. (a) Material preto manganésífero percolado no veio de quartzo, relativo a amostra R158\_2; (b) Material de preenchimento da junta na região inferior do veio de quartzo, relativo a amostra R158\_3. (I = Ilita; K = Caulinita; L = litioforita; M = Muscovita; Q = Quartzo). Fonte: Autores.

A análise do material do dique (R158\_4) permitiu a identificação de quartzo, titanita, goethita e caulinita (Figura 6). A titanita, que não havia sido diagnosticada em amostra de mão, aparece no difratograma, com o pico de maior intensidade em  $2\theta = 27,5^\circ$ . A goethita  $[\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{OOH}]$  (VELDE e MEUNIER, 2008), apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 21,2^\circ$ , e é caracterizada em amostra de mão como o material de coloração alaranjada da fração argila, encontrada em abundância na rocha alterada e conferindo a cor característica do material. Já a caulinita, com pico de maior intensidade em  $2\theta = 25^\circ$ , é o único argilomineral



encontrado na amostra, e é caracterizado por ser a argila de cor branca, encontrada em pequena quantidade na análise macroscópica.



**Figura 6** - Difratograma do dique, correspondente à amostra R158\_4. (G = Goethita; K = Caulinita; Q = Quartzo; T = Titanita). Fonte: Autores.

### PONTO H103

Neste ponto ocorre um milonito alterado composto de quartzo, mica branca, biotita, feldspato e argilas branca, alaranjada e vermelha. Ocorrem falhas preenchidas por material preto manganésífero, de aspecto argiloso, que reage efervescendo com o peróxido de hidrogênio. Esse material também é encontrado como um precipitado químico entre os planos de foliação e juntas da rocha e, ocasionalmente, são marcados por estrias de falha.

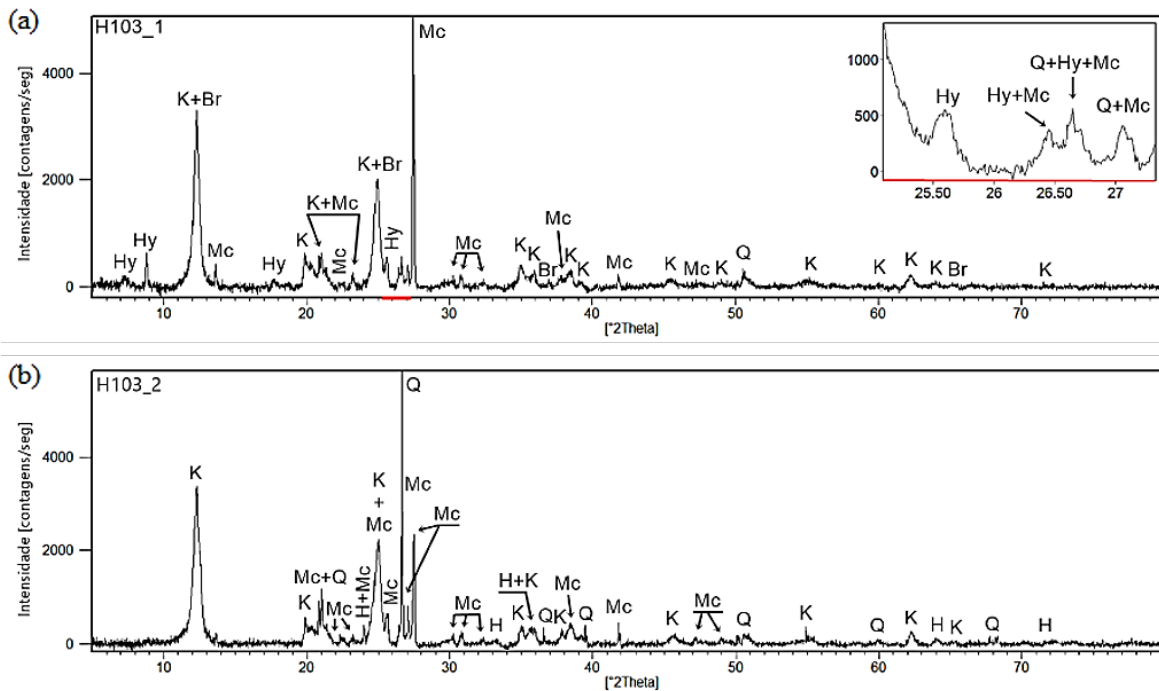
Foram amostrados os materiais presentes em dois planos de falhas para a análise por DRX: a amostra H103\_1, coletada em um plano de falha com película de material preto aderido à superfície do plano e a H103\_2, em um plano de falha que afeta o gnaiss.

A análise do material de preenchimento de cor preta (H103\_1) permite identificar quartzo, microclina, hidrobiotita, caulinita e birnessita (Figura 7a), enquanto a análise do material do espelho de falha sem preenchimento (H103\_2) indica a presença de quartzo, microclina, hematita e caulinita (Figura 7b).

O quartzo apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 26,6^\circ$  e a microclina em  $2\theta = 27,4^\circ$ . A hidrobiotita  $[K(Mg, Fe^{2+})_3(Al, Fe^{3+})Si_3O_{10}(OH, F)_2].[Mg, Fe^{2+}, Al)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O]$  (ANTHONY et al., 2001), que aparece com picos de maior intensidade em  $2\theta = 8,7^\circ$  e  $25,6^\circ$ , pode estar ligada ao intemperismo da biotita, lembrando que os dois minerais apresentam características diagnósticas semelhantes. A caulinita, único argilomineral detectado pela difratometria, apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 12,3^\circ$  e, por suas características físicas, é relacionado com a argila de cor branca observada na macroscopia. A birnessita  $[(Na, Ca)_{0.5}(Mn^{4+}, Mn^{3+})_2O_4 \cdot 1.5H_2O]$  (ANTHONY et al., 2001) apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 12,3^\circ$ , igual ao da caulinita, e por ser um óxido de manganês, reagir com o peróxido de hidrogênio, e exibir cor preta, considera-se que este mineral é o material preto manganésífero encontrado nos planos de falha, junta e foliação. A hematita apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 33,2^\circ$  e corresponde ao material argiloso vermelho encontrado em grande quantidade na rocha.



## Identificação de materiais de preenchimento de estruturas geológicas por difratometria de raios-x

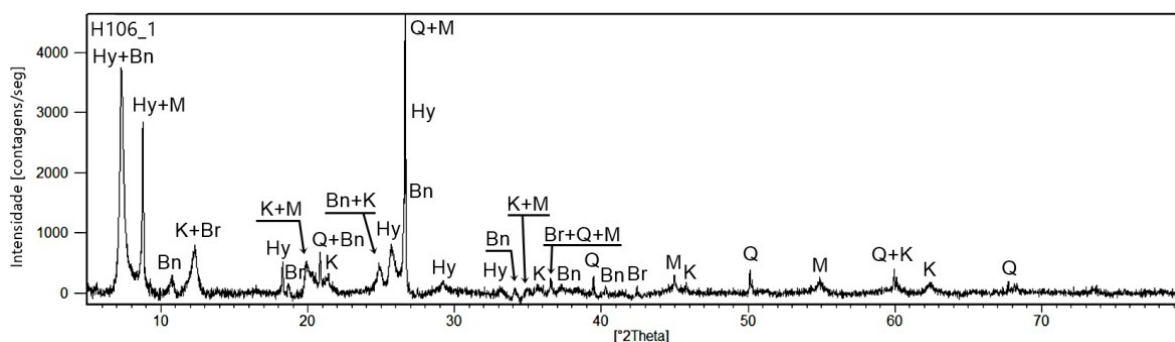


**Figura 7** - Difratogramas dos materiais amostrados no ponto H103. (a) Material preto no espelho de falha (H103\_1); (b) material do espelho de falha sem preenchimento (H103\_2). (Br = Birnessita; H = Hematita; Hy = Hidrobiotita; K = Caulinita; Mc = Microclina; Q = Quartzo). Fonte: Autores.

### PONTO H106

A rocha aflorante é um milonito alterado, composto de quartzo, feldspato, biotita, mica branca e argilas nas cores branca, rosa avermelhada e alaranjada. Está intensamente fraturado com zonas de falhas e juntas com preenchimento de um material preto argiloso que reage efervescendo com o peróxido de hidrogênio, indicando, portanto, a presença de Mn.

O material preto (H106\_1) presente na junta possui quartzo, muscovita, hidrobiotita, caulinita, bannisterita e birnessita (Figura 8). O quartzo apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 26,6^\circ$ , juntamente com a muscovita, que além desse pico, apresenta outro de maior intensidade em  $2\theta = 8,7^\circ$ . A hidrobiotita, apresenta picos de maior intensidade em  $2\theta = 8,7^\circ$  e  $25,6^\circ$ , e pode estar relacionada à ocorrência da biotita e dela provir pelo intemperismo, como explicado no item anterior. A caulinita é o único argilomineral presente na amostra, e possui o pico de maior intensidade em  $2\theta = 12,4^\circ$ .



**Figura 8** - Difrátograma correspondente ao material amostrado H106\_1. (Bn = Bannisterita; Br = Birnessita; Hy = Hidrobiotita; K = Caulinita; M = Muscovita; Q = Quartzo). Fonte: Autores.

A birnessita apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 36,8^\circ$ , e por ser um óxido de manganês, reagir com o peróxido de hidrogênio e exibir cor preta, corresponde ao material preto que preenche a junta.

É possível que esteja presente nesta amostra a bannisterita  $[KCa(Mn^{2+}, Fe^{2+}, Zn, Mg)_2(Si, Al)_2O_7(OH)_{16-12}H_2O]$ , com seu pico de maior intensidade em  $2\theta = 7,2^\circ$ . Trata-se de um silicato de manganês, que pode estar relacionado à mineralizações deste elemento por processos metamórficos (ANTHONY et al, 2001). Como existem ocorrências de gonditos e mineralizações de manganês já mapeadas na região (VIEIRA e MENEZES, 2015), sua presença é plausível, embora seu pico seja coincidente com o da hidrobiotita. Outro argumento para a ocorrência da bannisterita é a presença frequente de óxidos de manganês na região, que podem ser oriundos do intemperismo de silicatos contendo esse metal.

## PONTO H232

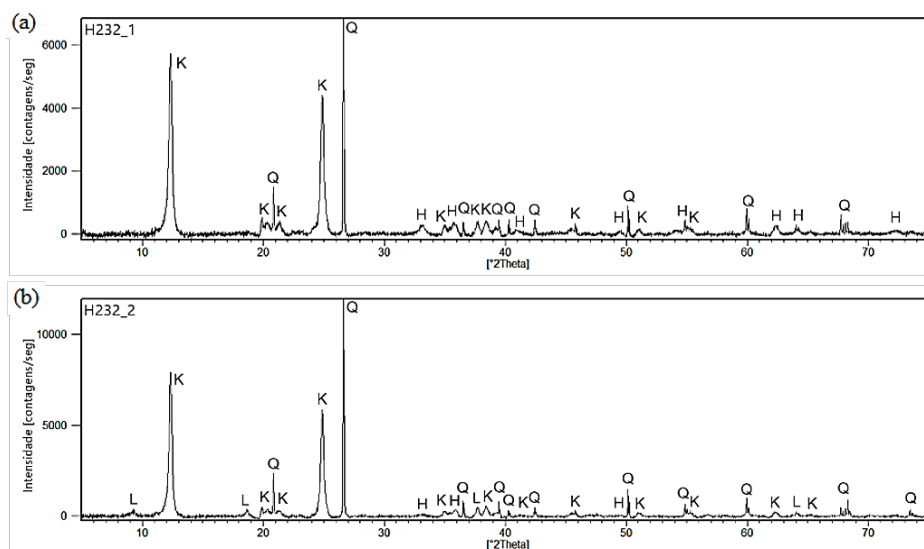
A rocha presente neste ponto é um gnaiss muito alterado, composto de quartzo, mica branca, biotita e argilas na cor vermelha, branca e laranja, que se encontra fraturado e falhado. Neste local também ocorre o material preto de preenchimento com granulação muito fina, semelhante a uma argila, que reage e efervesce em contato com peróxido de hidrogênio.

Neste afloramento, foram realizadas duas amostragens para análise por DRX: uma do material do espelho de falha (H232\_1) e outra do material preto encontrado na superfície da junta (H232\_2).

A análise do material do espelho de falha (H232\_1) determina a presença de quartzo, hematita e caulinita (Figura 9a), enquanto a análise do material preto de preenchimento da junta (H232\_2) determina a presença de quartzo, hematita, caulinita e litioforita (Figura 9b).

O quartzo apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 26,6^\circ$ . A hematita, com pico de maior intensidade em  $2\theta = 33,2^\circ$ , pode ser correlacionada macroscopicamente com o material argiloso avermelhado, encontrado em grande quantidade na amostra. A caulinita, único argilomineral observado nos difratogramas, apresenta pico de maior intensidade em  $2\theta = 12,3^\circ$  e, a partir de sua cor típica, é relacionada macroscopicamente com a argila branca. A litioforita, com o pico de maior intensidade em  $2\theta = 18,6^\circ$ , por ser um óxido de manganês que reage com o peróxido de hidrogênio, é relacionada ao material argiloso de cor preta encontrado como preenchimento da junta.

## Identificação de materiais de preenchimento de estruturas geológicas por difratometria de raios-x



**Figura 9** - Difrátogramas do material (a) no espelho de falha, H232\_1 e (b) material preto na superfície da junta, H232\_2. (H = Hematita; K = Caulinita; L = Litioforita; Q = Quartzo).

Fonte: Autores.

### PONTO H239

Ocorre neste local um gnaiss migmatizado alterado como rocha encaixante e um dique de diabásio alterado. A parte do migmatito observada está relacionado ao leucossoma, composto de quartzo, feldspato, mica branca, biotita, argilas vermelha e branca. O dique apresenta composição de quartzo, feldspato, biotita, um mineral granular preto e argila alaranjada e branca.

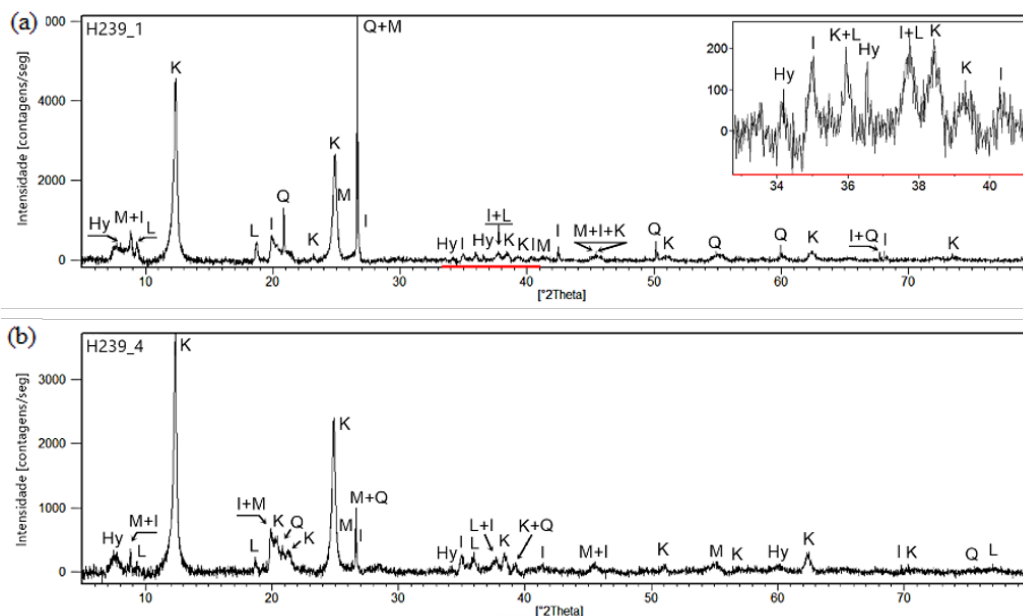
A rocha encaixante e o dique se apresentam com zonas de falhas e juntas, onde algumas dessas estruturas possuem sua superfície recoberta por um material preto manganífero, onde nas falhas aparece com estrias de falha, e reage efervescendo com o peróxido de hidrogênio.

Foram realizadas cinco amostragens neste afloramento para a análise difratométrica: material preto manganífero de duas falhas preenchidas na rocha encaixante (H239\_1 e H239\_4), material do espelho de duas falhas não preenchidas na rocha encaixante (H239\_2 e H239\_3) e material preto manganífero encontrado nas falhas e juntas do dique (H239\_5). Todas as falhas amostradas são classificadas como normais.

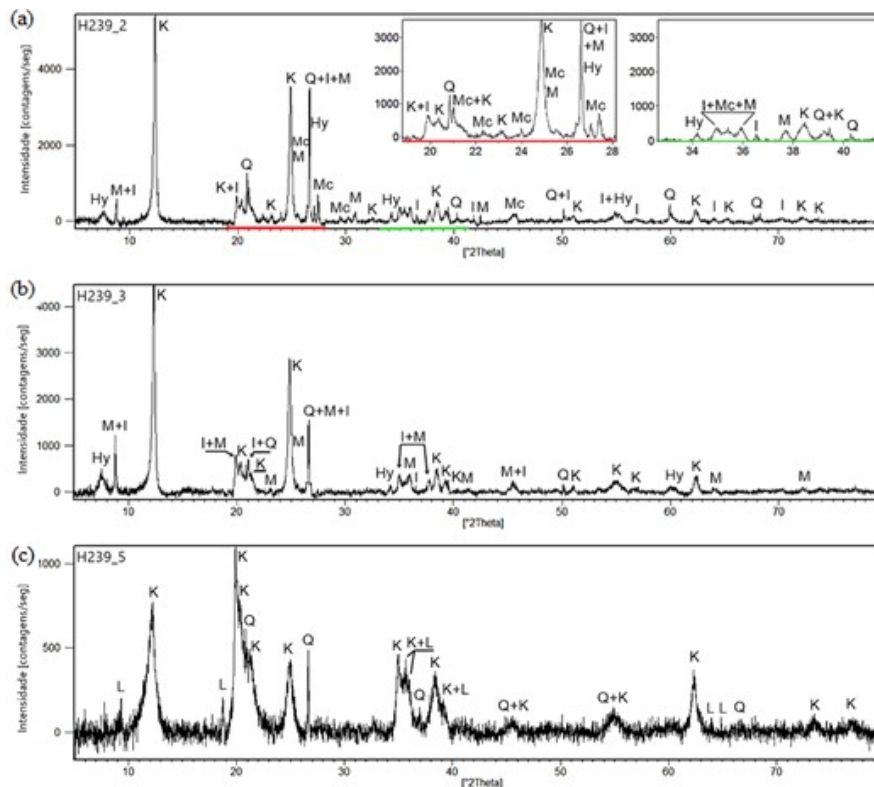
A análise do material do espelho de falha recoberto pelo material preto manganífero (H239\_1 e H239\_4) indica a presença de quartzo, muscovita, hidrobiotita, ilita, caulinita e litioforita (Figura 10a e 10b).

O quartzo apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 26,6^\circ$  e a muscovita apresenta dois picos de maior intensidade em  $2\theta = 8,8^\circ$  e  $26,6^\circ$ , o último sobrepondo com o pico do quartzo, também com 100% de intensidade. A hidrobiotita, com pico de maior intensidade em  $2\theta = 7,5^\circ$  está associada com a ocorrência da biotita. Dentre os argilominerais encontrados, a ilita apresenta dois picos de maior intensidade em  $2\theta = 8,8^\circ$ , com sobreposição de pico com a muscovita, também com 100% de intensidade, e  $19,8^\circ$ ; enquanto a caulinita apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 12,3^\circ$ . Esses argilominerais não foram diagnosticados macroscopicamente, porém os dois apresentam cor característica branca e podem ser relacionados com a argila branca encontrada em grande quantidade na rocha. A litioforita apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 18,8^\circ$ , correspondendo ao óxido de manganês de cor preta do espelho de falha.

Diferente das amostras anteriores, a análise do material do espelho de falha que não contém película de material preto não determina a presença de litioforita. Os difratogramas das amostras H239\_2 e H239\_3, apontam a mineralogia da própria rocha alterada falhada, composta de quartzo, muscovita, hidrobiotita, illita e caulinita. A análise da amostra H239\_2 ainda determinou a presença da microclina (Figura 11a e 11b).



**Figura 10** - Difratogramas das amostras (a) H239\_1 e (b) H239\_4. (Hy = Hidrobiotita; I = Illita; K = Caulinita; L = Litioforita; M = Muscovita; Q = Quartzo). Fonte: Autores.



**Figura 11** - Difratogramas das amostras (a) H239\_2; (b) H239\_3 e; (c) H239\_5. (Hy = Hidrobiotita; I = Illita; K = Caulinita; L = Litioforita; M = Muscovita; Mc = Microclina; Q = Quartzo). Fonte: Autores.

## Identificação de materiais de preenchimento de estruturas geológicas por difratometria de raios-x

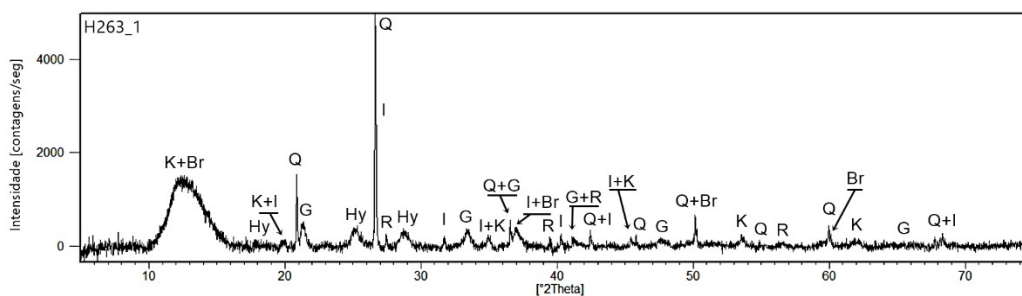
Dentre os minerais primários, o quartzo apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 26,6^\circ$ ; a muscovita apresenta maior intensidade em  $2\theta = 8,8^\circ$ ,  $26,6^\circ$  e  $35^\circ$  e a microclina em  $2\theta = 27,4^\circ$ . A hidrobiotita apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 7,7^\circ$ , relacionando-se com a alteração intempérica da biotita. A ilita apresenta três picos de maior intensidade em  $2\theta = 19,8^\circ$ ,  $26,5^\circ$  e  $34,8^\circ$ ; enquanto a caulinita apresenta em  $2\theta = 12,3^\circ$ . Os dois argilominerais não são diagnosticados macroscopicamente, porém pela cor característica dessas argilas, podem ser relacionadas a argila branca encontrada em grande proporção na rocha.

Já a análise do material preto manganífero de preenchimento de falhas e juntas do dique (H239\_5) mostrou a presença de quartzo, caulinita e litioforita (Figura 11c). O quartzo apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 26,6^\circ$ . A caulinita, único argilomineral encontrado, apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 12,4^\circ$ , e é relacionado macroscopicamente com a argila branca. A litioforita apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 18,8^\circ$  e corresponde ao material preto de preenchimento das falhas e juntas do dique.

### PONTO H263

Neste ponto, a rocha encaixante está muito intemperizada e não foi amostrada. O dique também está alterado e é composto de quartzo, biotita, mica branca e argilas branca, vermelha e amarela. Foi amostrado o material presente no plano de ruptura do dique, no contato com a rocha encaixante, relativo à amostra H263\_1. Nesse plano de ruptura nota-se um material preto manganífero, de aspecto argiloso, que reage efervescendo com o peróxido de hidrogênio.

A análise do material preto manganífero encontrado na superfície do dique (H263\_1) determina a presença de quartzo, rutilo, hidrobiotita, goethita, caulinita, ilita e birnessita (Figura 12). O quartzo apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 26,6^\circ$ . O rutilo não foi identificado em amostra de mão, mas aparece no difratograma com o pico de maior intensidade em  $2\theta = 27,4^\circ$ . A hidrobiotita apresenta dois picos de maior intensidade, em  $2\theta = 25,3^\circ$  e  $28,5^\circ$ . A goethita apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 21,3^\circ$  e é caracterizado na amostra de mão como o material de fração argila de coloração alaranjada, encontrada em grande abundância na rocha, dando a cor característica ao dique. Dentre os argilominerais encontrados, a caulinita apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 12,3^\circ$  e a ilita apresenta dois picos de maior intensidade em  $2\theta = 19,9^\circ$  e  $35^\circ$ . Esses argilominerais não foram diagnosticados macroscopicamente, porém os dois apresentam cor característica branca, e podem ser relacionados com a argila branca encontrada em pequena quantidade na rocha. A birnessita, apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 12,3^\circ$ , o mesmo que o da caulinita, e por ser um óxido de manganês, reagir com o peróxido de hidrogênio, e possuir cor preta, é relacionado com o material preto encontrado na superfície do dique.



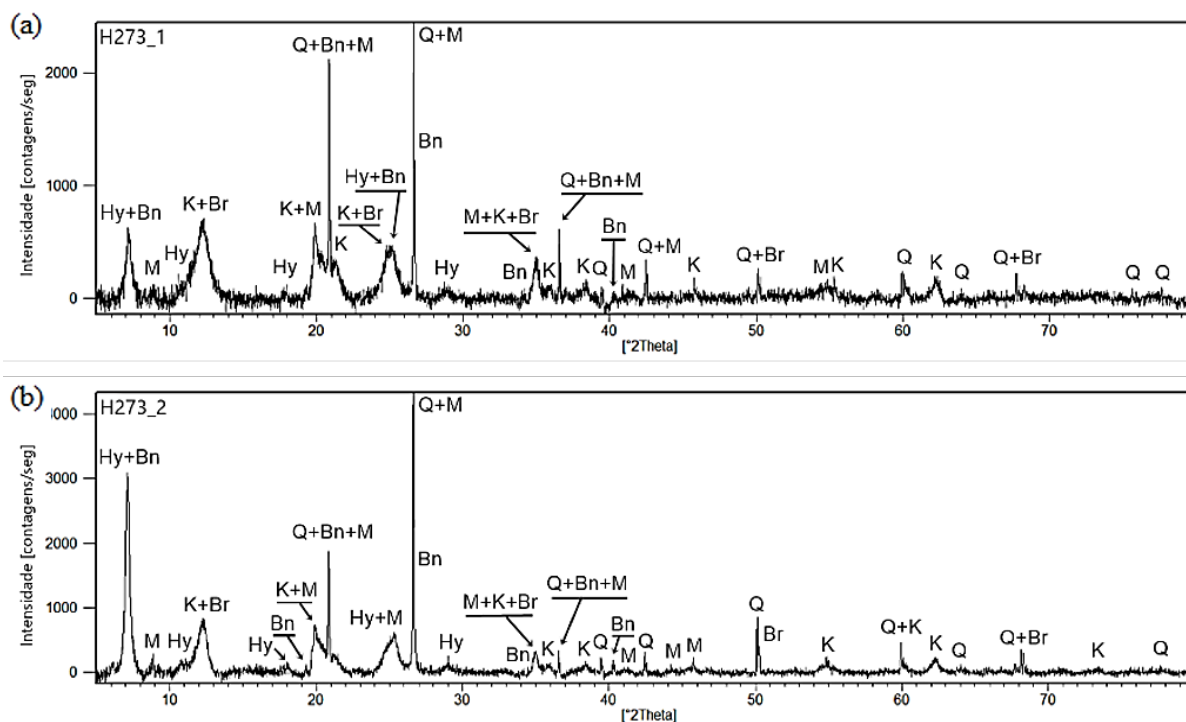
**Figura 12** - Difratograma correspondente ao material amostrado H263\_1. (Br = Birnessita; G = Goethita; Hy = Hidrobiotita; I = Ilita; K = Caulinita; R = Rutilo; Q = Quartzo). Fonte: Autores.

## PONTO H273

Neste local ocorre um gnaiss muito alterado contendo quartzo, feldspato, mica branca, biotita e argilas nas cores laranja e branca, que apresenta dois planos de falhas (obíquas destrais e sinistrais), cujos espelhos se encontram recobertos por um material preto, que por vezes possui aspecto argiloso ou aparecem como grãos de granulação muito fina. Essa porção preta do plano apresenta estrias de falha e reage efervescendo com peróxido de hidrogênio.

Foram realizadas duas amostragens neste afloramento para análise composicional utilizando a difração de raio-X: material preto manganífero de preenchimento das duas falhas, correspondentes aos pontos H273\_1 e H273\_2.

As análises dos materiais dos espelhos de falha preenchidos pelo material preto manganífero (H273\_1 e H273\_2) determinam a presença de quartzo, muscovita, hidrobiotita, caulinita, bannisterita e birnessita (Figura 13a e 13b). O quartzo apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 26.6^\circ$ , juntamente com a muscovita, que além desse pico, apresenta outro de maior intensidade em  $2\theta = 8,8^\circ$ . A hidrobiotita apresenta dois picos de maior intensidade em  $2\theta = 7,1^\circ$  e  $25,3^\circ$ . A caulinita é o único argilomineral diagnosticado pela análise e apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 12,4^\circ$ .



**Figura 13** - Difratomogramas das amostras (a) H273\_1 e (b) H273\_2. (Bn = Bannisterita; Br = Birnessita; Hy = Hidrobiotita; K = Caulinita; M = Muscovita; Q = Quartzo). Fonte: Autores.

A bannisterita apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 7.2^\circ$ , o mesmo que o da hidrobiotita, e não foi diagnosticada em amostra de mão. Por ser um silicato contendo manganês e apresentar cor preta, pode-se relacionar com o material preto granular de granulação fina, encontrado nos espelhos de falha.

A birnessita apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 12.3^\circ$ , o mesmo que o da caulinita, e por ser um óxido de manganês, reagir com o peróxido de hidrogênio, e exibir cor preta, é relacionado com o material preto argiloso encontrado nos espelhos de falha.



## Identificação de materiais de preenchimento de estruturas geológicas por difratometria de raios-x

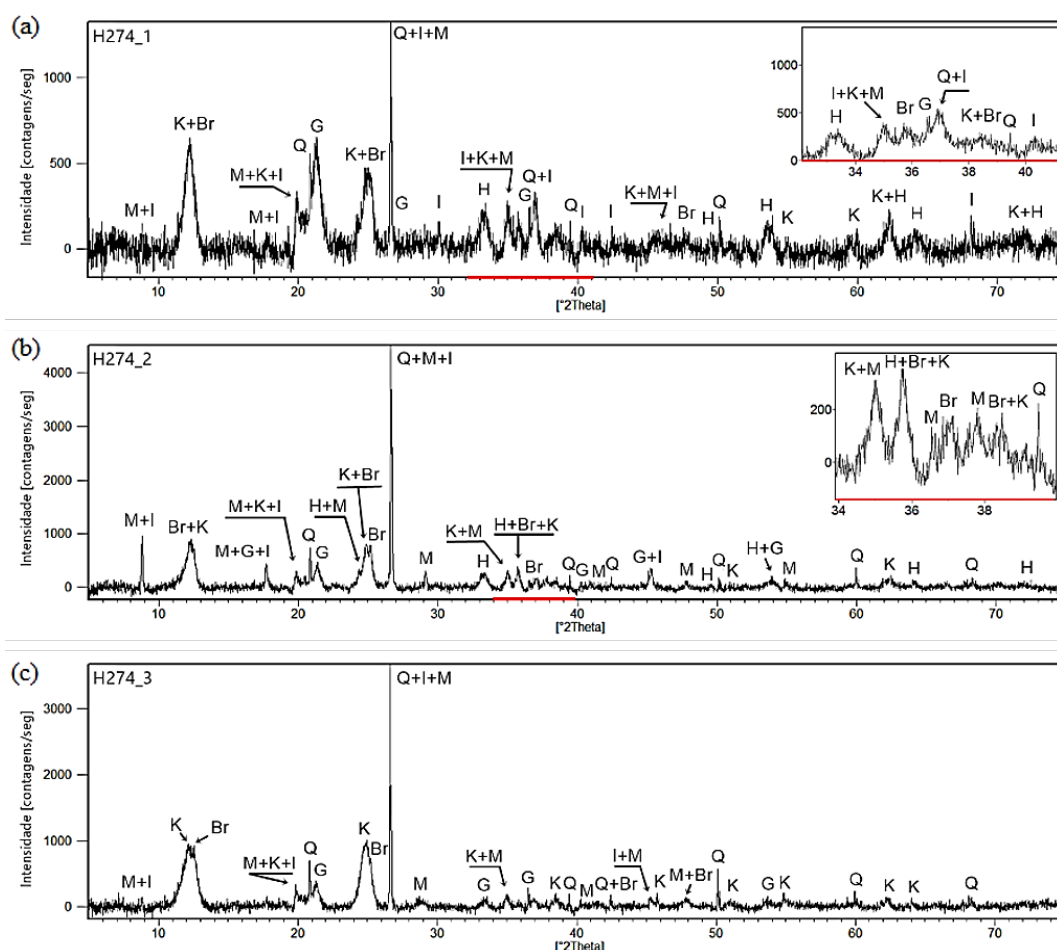
### PONTO H274

Neste ponto corre gnaiss migmatizado muito alterado com quartzo, feldspato, biotita, mica branca, argilas branca, vermelha e amarela. A rocha apresenta planos estriados, por vezes preenchidos por material preto argiloso que reage efervescendo com o peróxido de hidrogênio.

Essa rocha é cortada por um dique muito alterado, composto de quartzo, feldspato, biotita, mica branca, e argilas branca, amarela e vermelha, onde a quantidade de argila laranja se sobressai, dando a cor alaranjada à rocha. Falhas presentes no dique são por vezes preenchidas por um material preto manganêsífero marcado por estrias de falha.

Foram amostrados para análise por DRX: material preto manganêsífero do plano estriado na rocha encaixante, correspondente à amostra H274\_1, e o material preto manganêsífero de preenchimento das superfícies de falha do dique, correspondentes às amostras H274\_2 e H274\_3. As falhas amostradas no dique apresentam movimento normal.

A análise do material preto da superfície estriada encontrada na rocha encaixante (H274\_1) e de uma das falhas do dique preenchidas pelo material preto (H274\_2) determinam a presença de quartzo, muscovita, goethita, hematita, caulinita, ilita e birnessita. Já o material analisado da outra falha preenchida pelo material preto no dique (H274\_3) não acusa a presença da hematita, porém todos os outros minerais listados são encontrados (Figura 14).



**Figura 14** - Difratogramas referentes ao ponto H274. (a) material preto na superfície estriada da rocha encaixante, amostra H274\_1; (b) e (c) material preto nos planos de falha no dique. (Br = Birnessita; G = Goethita; H = Hematita; I = Ilita; K = Caulinita; M = Muscovita; Q = Quartzo). Fonte: Autores.



O quartzo apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 26.6^\circ$ , juntamente com a muscovita, que além desse pico, apresenta outro de maior intensidade em  $2\theta = 8.8^\circ$ . A goethita, com pico de maior intensidade em  $2\theta = 21.2^\circ$ , e a hematita com pico de maior intensidade em  $2\theta = 33.2^\circ$  também ocorrem. A caulinita apresenta três picos de maior intensidade em  $2\theta = 12.3^\circ$ ,  $24.8^\circ$  e  $62.3^\circ$ , enquanto a ilita apresenta picos de maior intensidade em  $2\theta = 8.8^\circ$  e  $19.8^\circ$ , por vezes em  $26.6^\circ$ . Esses foram os únicos argilominerais detectados no difratograma, e não são diagnosticados macroscopicamente, porém pela cor característica dessas argilas, podem ser relacionadas a argila branca encontrada na rocha. A birnessita apresenta o pico de maior intensidade em  $2\theta = 12.2^\circ$ , o mesmo que o da caulinita, e por ser um óxido de manganês, reagir com o peróxido de hidrogênio, e exibir cor preta, é relacionado com o material preto manganífero e argiloso encontrado na superfície estriada.

## CONCLUSÕES

O uso da técnica de DRX para identificar a composição mineralógica dos materiais de preenchimento das estruturas rúpteis na área estudada permitiu tecer as seguintes conclusões:

- As fases cristalinas identificadas nos planos de estruturas rúpteis presentes na área estudada são compostas por minerais primários provenientes da própria rocha e minerais secundários formados por processos intempéricos.

Os minerais primários identificados são quartzo, muscovita, microclina, rutilo, titanita e bannisterita, e os minerais de alteração identificados são caulinita, ilita, hematita, goethita, hidrobiotita, litioforita e birnessita.

A presença de ilita e de óxidos de Mn nos materiais de preenchimento de estruturas geológicas permitirá, em trabalhos futuros, aplicar técnicas de datação para determinar a idade máxima da formação dessas estruturas, já que o material secundário é por elas afetado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTHONY, J. W.; BIDEAUX, R. A.; BLADH, K. W.; NICHOLS, M. C. (Eds). **Handbook of Mineralogy**, Mineralogical Society of America.USA, 2001.Disponívelem: <<http://www.handbookofmineralogy.org/>>.

BRINDLEY, G.W. **Identification of clay minerals by x-ray diffraction analysis**.Clay Clay Miner., v. 1.119 p. 1952.

BUNACIU, A. A; UDRISTIOIU, E. G.; ABOUL-ENEIN, H. Y. **X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications**.Critical Reviews in Analytical Chemistry. v. 45, p. 289–299. 2015.

CALEGARI, S. S.; NEVES, M. A.; GUADAGNIN, F.; FRANÇA, G. S.; VINCENTELLI, M. G. C.**The Alegre Lineament and its role over the tectonic evolution of the Campos Basin and adjacent continental margin, Southeastern Brazil**.Journal of South American Earth Sciences, v. 69, p. 226–242, 2016.

CHIPERA, S. J.; BISH, D. L. **Fitting Full X-Ray Diffraction Patterns for Quantitative Analysis: A Method for Readily Quantifying Crystalline and Disordered Phases**.Advances in Materials Physics and Chemistry. v. 3, p. 47-53. 2013.

## **Identificação de materiais de preenchimento de estruturas geológicas por difratometria de raios-x**

GEOBASES. **Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo**: INCAPER, 2002. Disponível em: <<http://www.geobases.es.gov.br/portal>>. Acesso em: 28 ago. 2016.

HILLIER, S. **Quantitative Analysis of Clay and other Minerals in Sandstones by X-ray Powder Diffraction (XRPD)**. Int. Assoc. Sedimentol. Publ. v. 34, p. 213-251. 2003.

HUGHES, R. E.; MOORE, D. M.; GLASS, H. D. **Qualitative and Quantitative Analysis of Clay Minerals in Soils**. Soil Science Society of America: Illinois State Geological Survey. 1994.

KHULBE, K. C.; FENG, C. Y.; MARSUURA, T. Membrane Processes – Volume I. In: UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization; EOLSS – Encyclopedia of Life Support Systems. **Encyclopedia Of Desalination and Water Resources (DESWARE)**. EolssPublishers: Reino Unido, 2010. p. 1-375.

SHRIVASTAVA, V. S. **X-ray Diffraction and Mineralogical Study of Soil: A Review**. Journal of Applied Chemical Research, v. 9, p. 41-51. 2009.

SPEAKMAN, S. A. **Introduction to X-Ray Powder Diffraction Data Analysis**. MIT Center for Materials Science and Engineering: Massachusetts Institute of Technology. 2013. Disponível em: <<http://prism.mit.edu/xray/oldsite/tutorials.htm>>. Acesso em: 07/02/2018.

ŚRODÓN, J.; DRITS, V. A.; MCCARTY D. K.; HSIEH, J. C. C.; EBERL, D. D. **Quantitative X-ray Diffraction Analysis of Clay-bearing Rocks from Random Preparations**. Clays and Clay Minerals, v. 49, n. 6, p. 514-528. 2001.

VELDE, B.; MEUNIER, A. **The origin of clay minerals in soils and weathered rocks**. Springer: Berlim, 2008. 406 p.

VIEIRA, V. S.; MENEZES, R. G. (Org). **Geologia e recursos minerais do estado do Espírito Santo: Texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais, escala 1:400.000**. Belo Horizonte: CPRM, 2015. 289 p.